

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 3(152) ♦ 2013

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

Главный редактор
Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора
Лучинин В. В.

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

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

Отв. секретарь
Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:
Издательство
"Новые технологии"

Издается с 1999 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Раткин Л. С. Современные технологии проектирования, конструирования и производства нано- и микроэлектромеханических систем 2

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Пронин И. А., Аверин И. А., Димитров Д. Ц., Крастева Л. К., Папазова К. И., Чаначев А. С. Исследование чувствительности к этанолу переходов ZnO—ZnO:Fe на основе тонких наноструктурированных пленок, полученных с помощью золь-гель-технологии 6

Бодунов Д. С., Гавриленко В. П., Заблоцкий А. В., Кузин А. А., Кузин А. Ю., Митюхляев В. Б., Раков А. В., Тодуа П. А., Филиппов М. Н. Калибровка просвечивающих электронных микроскопов с помощью ГСО 10030—2011 11

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Пономарев Д. С. Разработка наногетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs на подложках фосфида индия 14

Минаков А. В., Ягоднищина А. А., Лобасов А. С., Рудяк В. Я., Бильский А. В. Расчетно-экспериментальное исследование перемешивания жидкостей в Т-образном микроканале 18

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

Милкин С. С., Стародубов А. В., Герман С. В., Маркин А. В., Горин Д. А., Вениг С. Б., Калинин Ю. А. Особенности техники измерения свойств коллоидных и эмульсионных систем на сверхвысоких частотах 22

Латохин Д. В., Воронков Э. Н. Численное моделирование микроплазменного пробоя в полупроводниковых структурах 26

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Амеличев В. В., Аравии В. В., Белов А. Н., Красюков А. Ю., Резнев А. А., Сауров А. Н. Создание интегральных компонентов усиления магнитного сигнала в беспроводной МЭМС на основе магнитоэлектрических элементов 29

Новиков С. Г., Гурий Н. Т., Беринцев А. В., Родионов В. А., Штанько А. А. Полупроводниковые фотопреобразователи координат и углов с отрицательной дифференциальной проводимостью 33

Бурдин Д. А., Фетисов Ю. К., Чашин Д. А., Экономов Н. А., Савченко Е. М. Пьезоэлектрический резонансный датчик магнитного поля с планарной возбуждающей катушкой 37

Гридчин В. А., Чебанов М. А., Васильев В. Ю. Влияние термических деформаций на температурную стабильность характеристик кремниевых резонансных сенсоров давления 41

БИОЭЛЕКТРОНИКА

Абрамов И. И. Мозг — объект органической гибридной нанoeлектроники, или взгляд со стороны. Часть II 45

Contents 55

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

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

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

УДК 623.3

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

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА НАНО- И МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Поступила в редакцию 14.08.2012

На состоявшейся 29 февраля 2012 г. научной сессии Отделения нанотехнологий и информационных технологий (ОНИТ) Российской академии наук (РАН) рассматривалась проблематика проектирования, конструирования и производства нанозлектромеханических и микроэлектромеханических систем (НЭМС и МЭМС). Особое внимание уделялось технологиям глубокого плазменного травления структур МЭМС с широким спектром аспектных отношений, созданию виброакустических микромеханических систем с волоконно-оптическим информационным каналом, квантовой информатике НЭМС, сверхвысокочастотным (СВЧ) системам на кристалле с элементами МЭМС на наногетероструктурах в арсениде галлия и технологическим основам создания микропреобразователей параметров движения на принципах переноса массы и заряда в электромеханических микросистемах.

Ключевые слова: Российская академия наук (РАН), Отделение нанотехнологий и информационных технологий, (ОНИТ) РАН, технологии глубокого плазменного травления, широкий спектр аспектных отношений, виброакустические микромеханические системы, волоконно-оптический информационный канал, квантовая информатика, СВЧ системы на кристалле с элементами МЭМС на наногетероструктурах, микропреобразователи параметров движения, принцип переноса массы и заряда в электромеханических микросистемах

Развитию технологии глубокого плазменного травления МЭМС-структур с широким спектром аспектных отношений было посвящено выступление члена-корреспондента РАН, заместителя директора по научной работе Физико-технологического института РАН (ФТИАН), д-ра физ.-мат. наук В. Ф. Лукичева. Были представлены особенности циклического процесса травления и осаждения, методы реактивного ионного травления, результаты изучения апертурного эффекта и их различные приложения. Также рассматривались

влияние углового распределения ионного потока на профиль канавки, принципы реализации Bosch-процесса с наблюдаемым апертурным эффектом и анализ структуры материала после травления оксида. Полученный после травления трехмерный профиль применим для создания изолирующих блоков для актюаторов. При исследовании синергизма при плазменном травлении особое внимание уделялось синергизму ионов и УФ при травлении фоторезиста, синергизму травления и осаждения при травлении оксида и синергизму ионов и нейтралов при травлении полупроводников. Технологии применимы, в частности, для производства чувствительных элементов кольцевых микрогиропов и микроакселерометров.

Проблематика разработки виброакустических микромеханических систем с волоконно-оптическим информационным каналом затрагивалась в докладе В. В. Лучинина и А. Н. Сергушичева (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет). Среди основных достоинств микромеханических систем с волоконно-оптическим информационным каналом отмечались повышенная взрыво- и пожаробезопасность, устойчивость оптоволоконного канала и микрооптомеханического модуля к электромагнитным воздействиям, миниатюрные размеры микрооптомеханического модуля, радиационная стойкость, малые потери при распространении сигнала по оптоволоконному каналу и высокая чувствительность к контролируемым физическим параметрам. Были представлены общие схемы и методы оптимизации оптико-механических параметров для интерферометрической волоконно-оптической системы и волоконно-оптической системы с модуляцией мощности излучения, основные конструктивные особенности и внешний вид микромембран:

- плоской мембраны Si_3N_4 ;
- плоской (разгруженной) композиционной мембраны и деформированной композиционной мембраны $\text{AlN}/\text{Si}_3\text{N}_4$;
- гофрированной мембраны Si_3N_4 с Ме-зеркалом и искусственными концентрическими гофрами (ИКГ);
- композиционной мембраны $\text{SiC}/\text{Si}_3\text{N}_4$ с Ме-зеркалом, ИКГ и самоорганизующимися радиальными гофрами.

Современные технологии формирования гофрированных структур включают не только сухое вертикальное или жидкостное изотропное травле-

ние Si на глубину гофра (более 20 мкм) с химической полировкой его поверхности, но и нанесение пленки нитрида кремния с низким уровнем механических напряжений для последующего формирования металлизированной области в центре мембраны "взрывной" литографией, а также глубокое сухое или жидкостное травление подложки до гофрированной пленки Si_3N_4 с разделением пластины на кристаллы. Были разработаны методики измерения механических характеристик мембран, проведены расчеты их параметров с управлением механическими напряжениями в активной композиционной мембране. В докладе рассматривались различные модели акустомеханических преобразователей и микрооптомеханических и комбинированных вибропреобразователей. Для систем направленного приема в разработанном программно-аппаратном комплексе когерентность каналов составляет порядка 99 % при их количестве до 64 с полосой рабочих частот до 10 кГц и частотой дискретизации 22,05 кГц. В разработанных совмещенных оптоволоконных системах видео- и аудиоконтроля устойчивость к электромагнитным воздействиям сочетается с удобством и простотой конструкции и миниатюрностью.

В докладе академика РАН А. А. Орликовского и А. Цуканова (ФТИАН) рассматривалось применение в квантовой информатике наноэлектромеханических систем (НЭМС). В качестве примеров НЭМС, в частности, были представлены детекторы механического смещения на базе одноэлектронного транзистора или квантового точечного контакта, электрод кантилевера и система полосковых SiC-резонаторов с собственными частотами 2...134 МГц, масс-спектрометры на основе углеродной нанотрубки (масса 10^{-24} г) или на основе НЭМС-мостика (масса до 10^{-21} г). Возможно построение гамильтониана для взаимодействующих сверхпроводникового кубита и НЭМС-резонатора, в котором учитывается емкость гибридной системы и в качестве слагаемого присутствует гамильтониан механического резонатора.

На базе НЭМС для гибридных квантовых систем возможно как активное охлаждение (метод боковой полосы), так и пассивное охлаждение (рефрижератор). При охлаждении НЭМС до основного состояния предполагаются не только низкие температуры рефрижератора (19...50 мК), но и высокие частоты НЭМС порядка 1...10 ГГц.

Среди базовых направлений изучения приложений НЭМС для квантовой информатики можно отметить взаимодействие между удаленными кубитами, переход от квантового к классическому описанию, потеря когерентности, проверка законов квантовой механики на макрообъектах, генерация

неклассических состояний (сжатие, запутывание, суперпозиция) и квантовые измерения.

Примером применения НЭМС в квантовом режиме является измерение состояния кубита с помощью НЭМС-резонатора. При этом частота НЭМС зависит от состояния кубита, а частотный сдвиг НЭМС рассматривается как функция приложенных к кубиту полей [1–2]. Среди первых исследований по применению НЭМС для квантовых вычислений следует отметить работы А. Клеланда, М. Геллера и А. Армура [3–4].

При взаимодействии НЭМС-резонаторов и кубитов важным компонентом является дилатационный пьезоэлектрический резонатор ("quantum drum") с частотой 6,1 ГГц [5]. В докладе были представлены гибридные системы "резонатор + фазовый кубит" и вакуумное расщепление Раби, примеры обмена квантом энергии между резонатором и кубитом с трансформацией виртуального фотона в фонон и обратно, модуляции когерентных осцилляций одиночного спина намагниченным кантилевером и зависимость заселенности основного спинового состояния центра от амплитуды НЭМС и от времени. Если в качестве проектов гибридных НЭМС для квантовой информатики можно рассматривать НЭМС-кантилевер с квантовой точкой (КТ), НЭМС-кантилевер с NV-центром в алмазе, НЭМС-мостик и ион, а также НЭМС-кантилевер + бозе-конденсат (БК), то проектируемыми масштабируемыми гибридными НЭМС для квантовой информатики являются НЭМС-мостик с массивом КТ, массив НЭМС с отдельными спинами, массив НЭМС + БК и массив НЭМС с ансамблем спинов [6].

Тема выступления директора ИСВЧПЭ РАН, д-ра техн. наук, профессора П. П. Мальцева — СВЧ системы на кристалле с элементами МЭМС на наногетероструктурах в арсениде галлия. По НИР "Исследования по разработке базовых технологий изделий микроэлектроники; систем на кристалле, в том числе в гетероинтеграции сенсорных и исполнительных элементов (СВЧ коммутаторы сигналов и варакторы)" и "Разработка базовых серийных технологий изделий микроэлектроники систем на кристалле, в том числе в гетероинтеграции сенсорных и исполнительных элементов (СВЧ усилители и встроенные антенны)", ФЦП "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники на 2008—2015 годы" при освоении диапазонов 30...40, 71...76 и 90...100 ГГц для производства систем на кристалле (СнК) в составе антенн, усилителей мощности, MEMS-коммутатора и фазовращателя разработаны методы и технологии проектирования СнК (излучатель + усилитель мощности, излучатель + маломощный усилитель) и МЭМС переключателей на основе арсенида галлия. Предложенная схема с индивидуальной встроенной антенной для маломощ-

мящего усилителя (МШУ) и усилителя мощности (УМ) обеспечивает переход к индивидуальным встроенным антеннам для приемного и передающего трактов. Реализация в виде одной или нескольких монолитных интегральных микросхем способствует снижению потерь тракта между антенной и МШУ, что сокращает шум в приемном тракте, повышает мощность передающего тракта.

В докладе были представлены приборные РНЕМТ структуры с односторонним легированием для МШУ и с двусторонним легированием для УМ. Рассматривалась структурная схема МШУ для расчета в САПР "Microwave office" (фирма "AWR") и топологический проект МШУ для электродинамического расчета в САПР "ADS" (фирма "Agilent Technologies"). Особое внимание уделялось топологии СнК (МШУ + антенна) размером $9,5 \times 6,5$ мм для диапазона 5 ГГц и размером $5,4 \times 6,5$ мм для диапазона 10...12 ГГц.

Были проведены ЭМ расчеты СВЧ параметров СнК с включением МШУ на 5 ГГц и антенного элемента, анализы поперечного сечения пластины для пассивных и активных элементов системы на кристалле. Представлены установки для построения диаграммы направленности и результаты измерений СВЧ параметров для диапазона 5 ГГц. Согласно полученным данным, потери отражения для диапазона 5 ГГц составляют 13 дБ при 5,5 ГГц. При измерениях с земляным экраном 30×30 мм с размером кристалла $6,4 \times 10,1$ мм форма диаграммы — кардиоида.

Аналогично, при измерениях СВЧ параметров СнК для диапазона 10...12 ГГц при потерях отражения в диапазонах 9...10 и 10,6...10,8 ГГц наблюдаются минимумы. Для размера кристалла $1,89 \times 6,77$ мм при измерениях с земляным экраном 50×50 мм форма диаграммы тороидная.

Таким образом, при традиционном методе машинного проектирования СнК, помимо неустойчивой работы схемы в ряде участков полосы частот, отсутствует возможность численной оптимизации в САПР, поскольку к тракту допустимо подключение только одного порта. Предлагаемый метод позволяет анализировать значения характеристик и оптимизировать работу схемы, в том числе посредством введения дополнительной шлейфовой цепи согласования между усилителем и антенной. Введение диссипативной цепи для повышения степени устойчивости обеспечивает эффективную работу усилителя и не формирует в рабочей полосе диссипации.

В докладе была представлена структура тракта для анализа в САПР, состоящая из четырехполюсной модели усилителя и четырехполюсной модели антенны, дополнительной цели согласования и частотно-селективной диссипативной цели. Были рассчитаны коэффициенты устойчивости и коэф-

фициенты отражения в полосе частот 1...50 ГГц после оптимизации тракта.

Среди различных вариантов ВЧ МЭМС коммутаторов можно выделить выполненный в HRL ВЧ МЭМС, ВЧ компании "Raytheon", ВЧ МЭМС Мичиганского университета, в том числе с низким напряжением питания, трехэлектродный с двумя нижними электродами (University of Illinois) и двух- и трехэлектродный (Columbia University).

Согласно электродинамическим расчетам ВЧ МЭМС коммутатора сигналов в полосе 1...16 ГГц, проведенным в САПР "ADS" фирмы "Agilent Technologies", развязка приемного и передающего каналов должна быть не ниже 40 дБ, а потери не превышать 0,5 дБ.

Современные технологии формирования МЭМС-устройств в виде воздушного моста (ВМ) включают подготовку подложки, формирование нижнего электрода и опор ВМ, пассивацию нижнего электрода, формирование жертвенного слоя и ВМ с последующим удалением жертвенного слоя и лишнего металла.

Технологическим основам создания микропреобразователей параметров движения на принципах переноса массы и заряда в электрохимических микросистемах был посвящен доклад академика РАН А. С. Бугаева (Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН), В. М. Агафонова (Факультет физической и квантовой электроники МФТИ) и В. Г. Криштова (Институт проблем микроэлектроники и особочистых материалов РАН, г. Черноголовка Московской области). Были представлены основные принципы работы молекулярно-электронного преобразователя. В частности, несколько помещенных в раствор электродов содержит преобразующий элемент. Между электродами протекает ток, и при наличии механического сигнала электролит приходит в движение, обеспечивая дополнительный перенос зарядов к электродам. Возникающий в системе электроток пропорционален внешнему воздействию, при этом усиление сигнала по мощности достигает $10^4...10^6$ раз.

Были представлены разные типы датчиков — вертикальный, горизонтальный и движений. На основе технологии были разработаны короткопериодичные и широкополосные сейсмометры и сенсоры вращательных движений, отличительными особенностями которых являются не только рекордно низкое энергопотребление, простота эксплуатации и высокая эффективность преобразования механического сигнала в электрический, но и высокая скорость выхода в рабочий режим, отсутствие элементов точной механики и длительность эксплуатации (до 25 лет).

Среди недостатков разработанных отечественных сейсмометров следует отметить более высокий уровень собственных шумов, чем у лучших зарубежных

аналогов. Но несомненными преимуществами являются работа при высокой влажности в экстремальных климатических условиях, наличие чувствительного элемента для обеспечения высокого коэффициента преобразования внешнего механического сигнала в электрический ток, способность измерения в широком динамическом и частотном диапазоне вращательных и линейных движений и отсутствие подверженности износу или разрушению прецизионных механических движущихся частей.

Недостатками разработанных микроакселерометров являются их относительно высокая стоимость и наличие верхней граничной частоты менее 1 кГц. К их преимуществам относятся динамический диапазон выше 110 дБ и низкий уровень шумов (ниже в 100...900 раз, чем у известных МЭМС-гироскопов и акселерометров).

Также в докладе были представлены амплитудно-частотные характеристики молекулярно-электронного преобразователя, распределение концентрации с планарными электродами. Среди основных тенденций развития — расширение динамического диапазона (более 120 дБ по сравнению с 60...70 дБ для МЭМС), снижение уровня собственных шумов (уровень собственных шумов в 100...1000 раз ниже, чем у лучших акселерометров и гироскопов на основе МЭМС) и расширение частотного диапазона.

В докладе были представлены схематические изображения планарного электродного узла, различные конфигурации электродов, разные этапы проектирования и изготовления электродного узла (верхняя и нижняя пластины). Были представлены образцы электродных узлов (в том числе черноголовский и зеленоградский образцы), трехмерные модели преобразующих электродных структур и результаты измерений (в том числе амплитудно-частотные характеристики чувствительного элемента сейсмодатчика с преобразующей ячейкой сеточного типа и сейсмического датчика, произведенного с применением планарных технологий). Среди дальнейших направлений развития технологий можно отметить организацию серийного мик-

роэлектронного производства (изготовление электродных узлов, датчиков on-chip и систем on-chip), разработку новых материалов и технологий (в том числе неупорядоченных и самоорганизующихся наноструктур) и создание новых типов приборов с расширением сфер применения (в частности, сейсморазведка, инерциальная навигация, мониторинг состояния сложных технических сооружений и конструкций, охранные системы, диагностика промышленного оборудования и установок, автомобильные сенсоры, бытовая электроника, медицинские приборы и робототехника).

Выводы

1. Возможна разработка российских СВЧ СнК на базе арсенида галлия, обеспечивающих передачу сигнала с высоким уровнем мощности.

2. Применение апертурного эффекта обеспечивает получение МЭМС-структур с заданным трехмерным профилем, также допустимо создание изолирующих блоков окислением с последующим травлением оксида.

3. Для повышения значений характеристик НЭМС необходимо исследование свойств новых материалов для подбора оптимальных конфигураций.

4. НЭМС-резонаторы могут применяться в квантовых вычислениях в качестве дополнительных компонентов ряда гибридных систем.

Список литературы

1. **КаНаге М. D.** et al. Nanomechanical measurements of a superconducting qubit // Nature. 2009. V. 459. P. 960.
2. **Regal C. A.** et al. // Measuring nanomechanical motion with a microwave cavity interferometer // Nature Physics. 2008. V. 4. P. 555.
3. **Cleland A. N., Geller M. R.** Superconducting Qubit Storage and Entanglement with Nanomechanical Resonators // PRL, 2004. V. 93. P. 070501.
4. **Armour A. D.** et al. Entanglement and Decoherence of a Micromechanical Resonator via Coupling to a Cooper-Pair Box // PRL. 2002. V. 88. P. 148301.
5. **O'Connell A. D.** et al. Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator // Nature, 2010. V. 464. P. 697.
6. **Цуканов А. В.** // Микроэлектроника. 2011. V. 40. P. 274, 359.

УДК 537.311.322

И. А. Пронин¹, студент, e-mail: pronin_i90@mail.ru,
И. А. Аверин¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
Д. Ц. Димитров², д-р физ.-мат. наук, доц.,
руководитель научно-исслед. лаб.,

Л. К. Крастева², аспирант,
К. И. Паназова², канд. хим. наук, гл. ассистент,
науч. работник,

А. С. Чаначев², студент

¹ Пензенский государственный университет

² Laboratory of Nanoparticle Science and Technology, Department of General and Inorganic Chemistry, Faculty of Chemistry and Pharmacy, University of Sofia, Sofia 1164, Bulgaria

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ЭТАНОЛУ ПЕРЕХОДОВ ZnO—ZnO:Fe НА ОСНОВЕ ТОНКИХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ- ТЕХНОЛОГИИ

Поступила в редакцию 10.07.2012

Исследуется чувствительность к этанолу гомопереходов на основе наноструктурированных слоев ZnO—ZnO:Fe, полученных с помощью золь-гель-технологии. В качестве отклика измерялась термоЭДС виртуальной термомпары, горячий конец которой представляет собой контакт на слое ZnO вблизи интерфейса ZnO/ZnO:Fe, а холодный — контакт на поверхности ZnO:Fe. Выяснено, что максимальной чувствительностью обладают образцы, верхний слой которых сформирован двумя и тремя погружениями в золь. Тенденция температурной зависимости отклика существенно зависит от толщины верхнего слоя.

Ключевые слова: наноструктурированные тонкие пленки ZnO, ZnO допированный Fe, газовый сенсор

Снижение рабочих температур и повышение чувствительности и селективности — одни из основных задач современной газовой сенсорики [1]. В настоящее время промышленностью выпускаются сенсоры, полученные с помощью дорогостоящих методов, использующих оборудование создания и поддержания определенного уровня вакуума в рабочей камере. Основной из них — метод магнетронного распыления [2—5]. В качестве альтер-

нативы традиционным методам перспективны методы золь-гель-технологии, использующие при формировании газочувствительных слоев операции как центрифугирования, так и окунания [6].

Достоинством золь-гель-методов для получения газочувствительных сенсоров является возможность получения сетчатых иерархических структур с геометрическими размерами ветвей, соизмеримых со значением дебаевской длины экранирования [7]. При этом обеспечивается высокая равномерность распределения чувствительных наноэлементов иерархических структур по поверхности адсорбента [8].

Композиты на основе ZnO, легированные железом, все чаще и чаще становятся объектом исследований как перспективные наноматериалы [9—11]. Авторы [12] считают, что ионы Fe⁺³ замещают ионы Zn⁺², вытесняя его в междоузлия. Энергия ионизации Fe⁺³ значительно превышает энергию ионизации Zn⁺², что приводит к уменьшению концентрации электронов проводимости и росту сопротивления. Однако электрические измерения образцов ZnO:Fe [13] показывают, что концентрация носителей заряда при уровне легирования железом в 1 ат. % возрастает с $2,76 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ до $3,92 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Авторами [14] экспериментально установлено, что допирование железом тонкой пленки ZnO способствует высокой чувствительности к этанолу (>70) при комнатной температуре.

В работе исследуются газочувствительные свойства интерфейсных областей с развитым нанорельефом между фрактальными слоями ZnO и ZnO:Fe (рис. 1). Нижний слой представляет фрактальную структуру из нелегированного оксида цинка, занимающего 2/3 поверхности керамической подложки Rubalit® 710, а верхний — фрактальную структуру оксида цинка, легированного железом в различных концентрациях. Оба фрактальных слоя получены с помощью золь-гель-технологии, площадь их перекрытия для всех образцов составляла 80 мм².

Пленкообразующие золи получали путем растворения ацетата цинка (CH₃COO)₂Zn · 2H₂O и нитрата железа Fe(NO₃)₃ · 9H₂O в 2-метоксиэтаноле CH₃OCH₂CH₂OH с последующим добавлением моноэтаноламина HOCH₂CH₂NH₂ в качестве по-

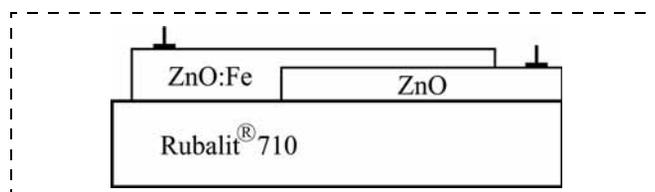


Рис. 1. Структура перехода ZnO/ZnO:Fe

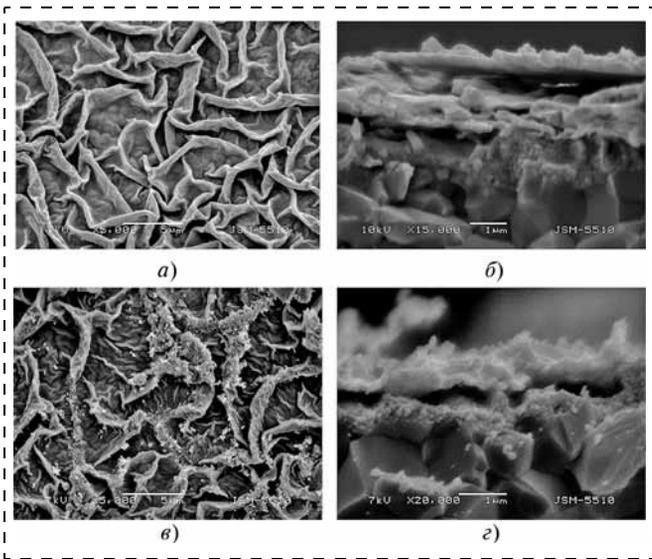


Рис. 2. Области перекрытия структур ZnO—ZnO:Fe:

a — вид поверхности, сформированной двумя погружениями в золь; *b* — скол гомоперехода, сформированного двумя погружениями в золь; *c* — вид поверхности, сформированной тремя погружениями в золь; *d* — скол гомоперехода, сформированного тремя погружениями в золь

верхностно-активного вещества [14]. Нанесение пленок из золь осуществлялось способом погружения покрываемого образца в пленкообразующий раствор [15]. Для получения желаемой толщины пленок проводилось многократное погружение с последующей сушкой в течение 30 мин при 80 °C после каждого. Окончательный отжиг пленок осуществлялся при температуре 500 °C в течение 1 ч.

Нижний, нелегированный слой ZnO во всех образцах формировался тремя погружениями в золь. Верхний слой легированного оксида формировался двумя и тремя погружениями в раствор золя, при этом менялась концентрация железа в пленках. На рис. 2 представлены области перекрытия структур ZnO/ZnO:Fe с содержанием железа в верхней пленке 3 ат. %, полученные с помощью растрового электронного микроскопа.

Из рис. 2 видно, что структуры имеют развитую пористо-фрактальную поверхность, ветви сеток состоят из квазисферических кластерных образований [16]. Такие структуры типичны при получении в результате спонтанного распада на две фазы — спинодального распада [17]. Данное явление имеет место при "химическом" охлаждении золя, т. е. полимеризации, сопровождающейся уменьшением комбинационной энтропии [18].

Изучение газочувствительных и электрофизических свойств изготовленных структур проводилось путем измерения термоЭДС, причем горячий конец виртуальной термопары представляет собой контакт на слое ZnO вблизи интерфейса ZnO/ZnO:Fe, а холодный — контакт на поверхности ZnO:Fe (см. рис. 1). При приближении "термопары" со слабыми температурными зависимостями усредненных коэффициентов термоЭДС ветвей и представлением, в котором

интерфейс между слоями играет роль спая термопары, выражение для разности потенциалов примет вид

$$\Delta U = (\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T, \quad (1)$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты Зеебека нижнего и верхнего слоев соответственно; ΔT — разность температур холодного и горячего концов. Коэффициенты Зеебека определяются из соотношения

$$\alpha_i = -\frac{k}{q} \left[2 + \ln \left(\frac{N_{C_i}}{n_i} \right) \right], \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана; q — элементарный заряд; N_{C_i} — эффективная плотность состояний в валентной зоне ZnO; n_i — концентрация электронов [19]. Используя формулы (1) и (2), получим зависимость термоЭДС структуры от разности температур холодного и горячего концов и концентрации носителей заряда в слоях:

$$\Delta U = \frac{k}{q} \ln \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \Delta T, \quad (3)$$

где n_1 и n_2 — концентрации носителей заряда в нижнем и верхних слоях соответственно. Таким образом, имеет место линейная зависимость термоЭДС от разности температур холодного и горячего концов. На рис. 3 представлена данная зависимость на воздухе и в присутствии этанола в концентрации 1000 ppm.

Из рисунка видно, что термоЭДС на воздухе для структуры ZnO—ZnO:Fe, полученной путем двух

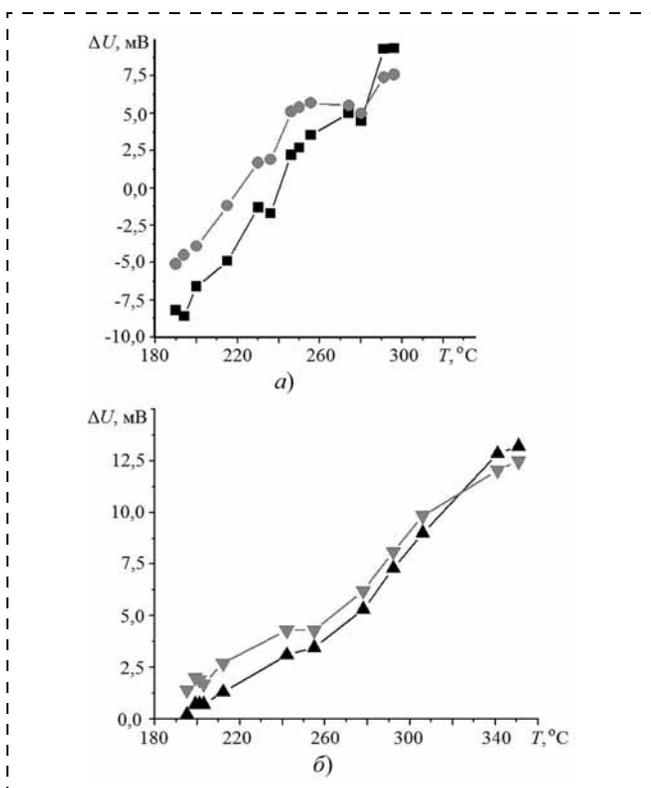


Рис. 3. Температурная зависимость термоЭДС структуры ZnO/ZnO:Fe с концентрацией Fe в верхнем слое 3 ат. %:

▲, ■ — без этанола; ●, ▼ — в присутствии паров этанола, $C = 1000$ ppm; *a* — два погружения для формирования верхнего слоя; *b* — три погружения для формирования верхнего слоя

погружений для формирования верхнего слоя, имеет значение $-8,5$ мВ при $T = 190$ °С и с ростом температуры возрастает, проходя через нуль при $T = 240$ °С, достигая $7,7$ мВ при $T = 295$ °С (рис. 3, а). В случае структуры ZnO/ZnO:Fe, полученной путем трех погружений для формирования верхнего слоя, термоЭДС на воздухе равна нулю при $T = 190$ °С, а с увеличением температуры возрастает и достигает $12,5$ мВ при $T = 350$ °С (рис. 3, б). Из рисунка видно, что данная зависимость имеет квазилинейный характер, причем на зависимости в присутствии паров этанола имеется два характерных участка. На первом из них — низкотемпературном — разность потенциалов всегда больше, чем в аналогичных условиях, но без воздействия газа, а на другом, высоко-температурном, — наоборот.

Это, вероятно, связано с конкурентной адсорбцией газов окислителя (кислорода) и восстановителя — этанола. При низких температурах преобладает адсорбция этанола. В этом случае концентрация n_2 будет расти и ΔU также будет возрастать. При высоких температурах на поверхности будут преобладать заряженные формы кислорода, что приведет к уменьшению n_2 и, соответственно, разности потенциалов.

На рис. 4 представлены концентрационные зависимости термоЭДС структур при температуре 200 °С.

Интересно отметить, что во всем исследованном диапазоне концентрации этанола термоЭДС структуры ZnO—ZnO:Fe в случае двух погружений для формирования верхнего слоя имеет отрицательное значение и меняется от $-6,6$ мВ в отсутствии паров до $-2,4$ мВ при концентрации паров этанола 3000 ppm (рис. 4, а). Для структуры ZnO/ZnO:Fe в случае трех погружений для формирования верхнего слоя термоЭДС имеет положительное значение в диапазоне от $0,9$ мВ в отсутствии паров до $2,8$ мВ при концентрации паров этанола 3000 ppm (рис. 4, б). В обоих случаях термоЭДС структуры достигает насыщения при концентрации этанола в районе 2000 ppm.

Проанализируем полученные результаты, для чего рассмотрим взаимодействие газа-анализатора с поверхностью структуры ZnO—ZnO:Fe. Для этого сделаем ряд допущений:

- толщина нижнего слоя ZnO h_1 много больше длины экранирования Дебая в оксиде цинка ($h_1 \gg L_D$);
- толщина пленки ZnO:Fe h_2 много меньше длины экранирования Дебая ($h_1 \ll L_D$);
- пленка ZnO:Fe представляет собой сплошной слой.

Представленные допущения позволяют положить, что в слое нелегированного оксида цинка суммарная концентрация носителей заряда n_1 при адсорбции газов па поверхность меняется незначительно, т. е. $n_1 = \text{const}$. Для слоя ZnO:Fe имеет место допущения плоских зон, т. е. при адсорбции газов отсутствует градиент концентрации носителей заряда по толщине слоя.

Разность потенциалов ΔU при нагреве контакта ZnO/ZnO:Fe определится из уравнения (3). Анализ данного выражения с учетом допущений показы-

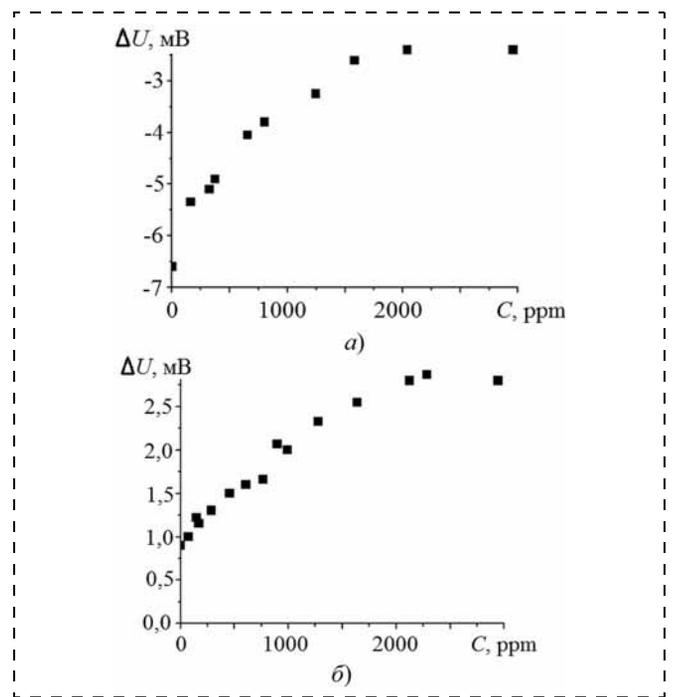


Рис. 4. Зависимость термоЭДС структуры ZnO/ZnO:Fe с концентрацией Fe в верхнем слое 3 ат. % от концентрации этанола при $T = 200$ °С:

а — два погружения для формирования верхнего слоя; б — три погружения для формирования верхнего слоя

вает, что $\Delta U \sim \ln(n_2)$. Найдем концентрацию n_2 слоя ZnO:Fe как функцию парциального давления газа донорного типа (этанола) в случае конкурентной адсорбции кислорода. Для этого рассмотрим уравнение электронейтральности слоя ZnO:Fe:

$$nV + N_a^- S = N_d V + N_D^+ S,$$

где V — объем слоя; N_a^- — поверхностная плотность заряженных форм кислорода; S — площадь слоя; N_d — концентрация легирующей примеси (Fe); N_D^+ — поверхностная плотность заряженных молекул газа-восстановителя (этанола). С учетом того, что $V = Sh_2$, получим:

$$nh_2 + N_a^- = N_d h_2 + N_D^+. \quad (4)$$

Концентрации заряженных форм N_a^- и N_D^+ связаны с общим числом молекул этанола N_D и кислорода N_a на поверхности распределением Ферми—Дирака:

$$N_a^- = \frac{N_a}{1 + 0,5 \exp\left(\frac{E_F - E_a}{kT}\right)};$$

$$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_F - E_D}{kT}\right)},$$

где E_F — энергия Ферми полупроводника; E_a и E_D — энергии ионизации акцепторного и донорного уровней соответственно. Введя обозначения

$$\alpha = N_c \exp\left(\frac{E_c - E_a}{kT}\right), \beta = N_c \exp\left(\frac{E_c - E_D}{kT}\right),$$

где E_c — дно зоны проводимости, перепишем уравнение (4) в виде

$$\frac{N_a}{1 + \frac{2\alpha}{n}} - \frac{N_D}{1 + \frac{2n}{\beta}} = (N_D - n)h_2.$$

С учетом этого запишем уравнение баланса молекул кислорода и этанола на поверхности полупроводника [20]:

$$\begin{cases} p_a(N_s - N_a - N_D) = \frac{2\alpha}{n} \frac{N_a}{1 + \frac{2\alpha}{n}}, \\ p_D(N_s - N_a - N_D) = \frac{2n}{\beta} \frac{N_D}{1 + \frac{2n}{\beta}} \end{cases} \quad (5)$$

где p_a и p_D — парциальное давление кислорода и

$$v \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right),$$

этанол, нормированные на величину $\frac{v \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)}{\psi}$, где v — частота колебания фононов; Q — теплота десорбции соответствующих молекул газа; ψ — кинетический коэффициент изотермы Ленгмюра; N_s — число поверхностных центров на единицу площади.

Анализируя систему (5), приходим к следующему соотношению:

$$p_D = \frac{-p_a n^2 + \eta_1 n + \eta_2}{2n_a n^2 + \eta_3 n + \eta_4} n, \quad (6)$$

где $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ — размерные коэффициенты, не зависящие от давления этанола над полупроводником.

Анализ полученного выражения (6) показывает, что в аналитическом виде выразить концентрацию носителей заряда через парциальное давление этанола невозможно. Поэтому искомая функция $\Delta U = f(p_D)$ рассчитывается совместным численным решением уравнений (3) и (6). Для примера на рис. 5

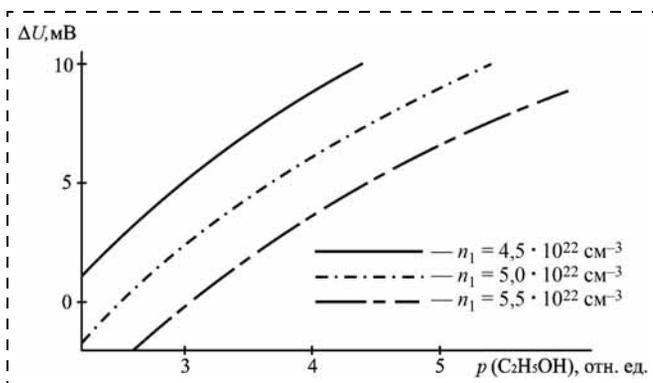


Рис. 5. Зависимость термоЭДС от парциального давления этанола

показана зависимость термоЭДС сенсора от парциального давления этанола для различных концентраций носителей заряда в слое нелегированного ZnO.

Анализ рисунка показывает, что зависимость термоЭДС от парциального давления газа-восстановителя удовлетворительно описывается зависимостью

$$\Delta U(p_D) = A \ln(p_D^\lambda) + B,$$

где $\lambda \approx 0,9$; A, B — константы, зависящие от сорта газа, а также от свойств полупроводника.

Чувствительность предложенного типа сенсоров S определяется выражением

$$S = \left| \frac{\Delta U_{\text{возд}} - \Delta U_{\text{газ}}}{\Delta U_{\text{возд}}} \right| \cdot 100 \%,$$

где $\Delta U_{\text{возд}}$ и $\Delta U_{\text{газ}}$ — термоЭДС сенсора на воздухе и в присутствии паров этанола.

На рис. 6 представлены температурные зависимости чувствительности структур к этанолу. Как видно из рисунка, имеется максимум чувствительности, причем для трехслойного образца он смещен в область низких температур.

Большие значения чувствительности образца, верхний слой которого сформирован тремя погружениями, получаются потому, что $\Delta U_{\text{возд}}$ приближается к нулю при понижении температуры, а его значение находится в знаменателе при расчете чувствительности. Как видно из рис. 3, в случае структуры ZnO/ZnO:Fe, полученной путем двух погружений для формирования верхнего слоя, отклик на

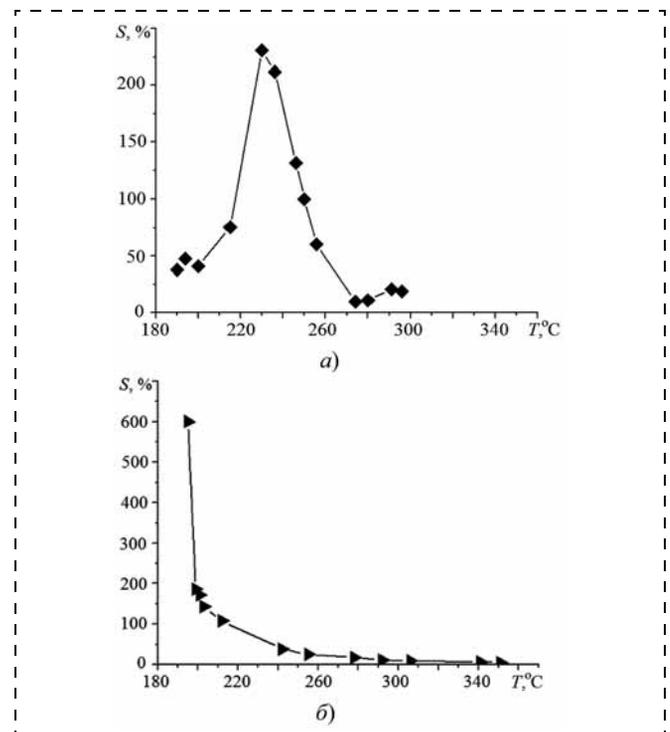


Рис. 6. Зависимость чувствительности структуры ZnO/ZnO:Fe с концентрацией Fe в верхнем слое 3 ат. % от температуры:

а — два погружения для формирования верхнего слоя; б — три погружения для формирования верхнего слоя

пары этанола намного больше, хотя и получается, что чувствительность формально меньше.

В заключение отметим, что предложенная качественная модель позволяет описать характер изменения свойств сенсорных структур. Модель описывает линейный характер возрастания термоЭДС с ростом перепада температур, а также наличие максимума сигнала в определенном температурном интервале и смещение его в область более низких температур при увеличении концентрации железа. Вид наноструктурированной поверхности контакта не позволял надеяться на эффективность столь простых модельных предположений. Как правило, в термоэлектрических материалах с нанорельефом приходится учитывать особенности явлений переноса с учетом целого семейства значений характерных длин. Кроме дебаевской длины экранирования вводятся характерные длины изменения температуры (отношение температуры к градиенту температуры). Эти характерные длины изменения температуры сравниваются с характерными длинами свободного пробега носителей заряда по импульсам, значением характерной диффузионной длины, значением рекомбинационной длины и др. Физика описания процессов переноса резко осложняется. Но в области невысоких температур, а точнее, низких значений градиента температуры, влияние этих эффектов незначительно. Фактически модель, описывающая термоэлектрические свойства сенсора, учитывает только особенность допирования ZnO атомами Fe. При этом предполагается, что при растворении Fe в ZnO в виде Fe₂O₃ концентрация вакансий в подрешетке металла возрастает, и атомы цинка или железа, занимающие в этой структуре деления эти вакансии, играют роль доноров [21]. При адсорбции кислорода и каталитическом окислении этанола [22] именно эти слои играют определяющую роль.

Таким образом, изготовлены и исследованы структуры ZnO/ZnO:Fe. Выяснено, что полученные пленки имеют развитую пористую структуру, являющуюся продуктом спинодального распада зольей. На основе уравнения электронейтральности полупроводника построена модель отклика полученных структур на воздействие паров этанола, достаточно точно описывающая экспериментальные результаты. Экспериментально выяснены качественные отличия пленок, полученные двумя и тремя погружениями для формирования верхнего слоя.

Авторы из Болгарии выражают благодарность проекту "FP7 BeyondEverest", а также "DO02-207" Национального Научного Фонда Болгарии (NSFB). Авторы благодарны также менеджеру по продажам CeramTec AG (95615 Марктредвиц, Германия) Г. Вагнеру за бесплатное предоставление подложек Rubalit® 710 для исследований.

Список литературы

1. Аверин И. А., Никулин А. С., Мошников В. А., Печерская Р. М., Пронин И. А. Чувствительный элемент газового

сенсора с наноструктурированным поверхностным рельефом // Датчики и системы. 2011. № 2. С. 24—27.

2. Bakin A. S., Bestaev M. V., Dimitrov D. Tz. et al. SnO₂ based gas sensitive sensor // Thin Solid Films. 1997. Т. 296, N 1—2. С. 168—171.

3. Вошилова Р. М., Димитров Д. Т., Долотов Н. И., Кузьмин А. Р., Махин А. В., Мошников В. А., Таиров Ю. М. Формирование структуры газочувствительных слоев диоксида олова, полученных реактивным магнетронным распылением // Физика и техника полупроводников. 1995. Т. 29, № 11. С. 1987—1993.

4. Chou S. M., Teoh L. G., Lai W. H., Su Y. H., Hon M. H. ZnO:Al Thin Film Gas Sensor for Detection of Ethanol Vapor // Sensors. 2006. N 6 (10). P. 1420—1427.

5. Chang J. F., Kuo H. H., Leu I. C., Hon M. H. The effects of thickness and operation temperature on ZnO:Al thin film CO gas sensor // Sensors and Actuators. 2002. B 84. P. 258—264.

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

7. Аверин И. А., Карпова С. С., Никулин А. С. и др. Управляемый синтез тонких стекловидных пленок // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 1. С. 23—25.

8. Moshnikov V. A., Gracheva I. E., Kuznezov V. V. et al. Hierarchical nanostructured semiconductor porous materials for gas sensors // Journal of Non-Crystalline Solids. 2010. N 356. P. 2020—2025.

9. Mozia S., Heciak A., Morawski A. W. Preparation of Femodified photocatalysts and their application for generation of useful hydrocarbons during photocatalytic decomposition of acetic acid // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2010. N 216. P. 275—282.

10. Dong S., Xu K., Liu J., Cui H. Photocatalytic performance of ZnO:Fe array films under sunlight irradiation // Physica. 2011. B 406. P. 3609—3612.

11. Rosari Saleh, Suhendro Purbo Prakoso AdelFishli. The influence of Fe doping on the structural, magnetic and optical properties of nanocrystalline ZnO particles // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2012. N 324. P. 665—670.

12. Dinesha M. L., Jayanna H. S., Ashoka S., Chandrapp G. T. Temperature dependent electrical conductivity of Fe doped ZnO nanoparticles prepared by solution combustion method // Journal of Alloys and Compounds. 2009. N 485. P. 538—541.

13. Linhua Xu, Xiangyin Li. Influence of Fe-doping on the structural and optical properties of ZnO thin films prepared by sol-gel method // Journal of Crystal Growth. 2010. N 312. P. 851—855.

14. Kuo G.-H., Wang H. P., Hsu H. H., Wang J., Chiu Y. M., Jou C.-J. G., Hsu T. F., Chen F.-L. Sensing of Ethanol with Nanosize Fe—ZnO Thin Films // Journal of Nanomaterials Volume. 2009. Article ID 316035. 3 p.

15. Kaneva N. V., Dimitrov D. T., Dushkin C. D. Effect of nickel doping on the photocatalytic activity of ZnO thin films under UV and visible light // Appl. Surf. Sci. 2011. N 257. P. 8113—8120.

16. Аверин И. А., Мошников В. А., Пронин И. А. Особенности созревания и спинодального распада самоорганизующихся фрактальных систем // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 5. С. 29—33.

17. Аверин И. А., Александрова О. А., Мошников В. А. и др. Типы фазового распада растворов полимеров // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 7. С. 12—14.

18. Грачёва И. Е., Мошников В. А., Пронин И. А. Исследование материалов на основе диоксида кремния в условиях кинетики самосборки и спинодального распада двух видов // Нанотехника. 2011. № 2 (9). С. 46—54.

19. Антипов Б. Л., Сорокин В. С., Терехов Б. М. Материалы электронной техники. Задачи и вопросы. М.: Высш. шк., 1990.

20. Сысоев В. В. Мультисенсорные системы распознавания газов на основе металло-оксидных тонких пленок и наноструктур: Дисс. ... д-ра техн. наук. Саратов, 2009. 364 с.

21. Assenov R., Moshnikov V. A., Yaskov D. A. On the behavior of iodine in pbte and snte // Phus. stat. sol. A-appl. res. 1983. Vol. 18. N 11. P. 119—120.

22. Андреева Е. В., Зильберман А. Б., Ильин Ю. Л. и др. Влияние этанола на электрофизические свойства диоксида олова // ФТП. 1993. Т. 27. Вып. 7. С. 1095—1100.

Д. С. Бодунов^{1, 2}, мл. науч. сотр.,
В. П. Гавриленко^{1, 2}, д-р физ.-мат. наук,
 зам. ген. директора,
А. В. Заблоцкий^{1, 2}, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.,
А. А. Кузин², аспирант,
А. Ю. Кузин¹, д-р техн. наук, проф.,
 зам. ген. директора,
В. Б. Митюхляев¹, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.,
А. В. Раков¹, д-р физ.-мат. наук, проф.,
 гл. науч. сотр.,
П. А. Тодуа^{1, 2}, д-р физ.-мат. наук, проф.,
 ген. директор,
М. Н. Филиппов^{1, 2, 3}, д-р физ.-мат. наук, проф.,
 гл. науч. сотр.

¹ Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума, г. Москва, e-mail: fgurnicpv@mail.ru

² Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный МО

³ Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, г. Москва

КАЛИБРОВКА ПРОСВЕЧИВАЮЩИХ ЭЛЕКТРОННЫХ МИКРОСКОПОВ С ПОМОЩЬЮ ГСО 10030—2011

Поступила в редакцию 13.07.2012

Изложены результаты калибровки просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 с помощью стандартного образца ГСО 10030—2011, разработанного и изготовленного в Научно-исследовательском центре по изучению свойств поверхности и вакуума, при номинальном значении увеличения 30 000 крат. Относительная расширенная (коэффициент охвата $k = 2$) неопределенность измерений при калибровке составила 0,5 %.

Ключевые слова: стандартный образец, просвечивающий электронный микроскоп, калибровка, неопределенность измерений при калибровке

Введение

Одним из основных методов характеристики нанообъектов и наноструктур является метод просвечивающей электронной микроскопии. Для обеспечения достоверности получаемой данным методом информации необходима калибровка просвечивающих электронных микроскопов (ПЭМ), которая может быть проведена с использованием различных тест-объектов или стандартных образцов (СО). Использование для калибровки СО утвержденного типа должно обеспечить прослеживаемость измерений размерных параметров нанообъектов к первичному эталону длины — метру.

До недавнего времени, ввиду отсутствия отечественных разработок, для калибровки ПЭМ при-

меняли импортные тест-объекты, тип которых не утвержден установленным в Российской Федерации порядком. Основным параметром ПЭМ, определяемым в процессе калибровки, является коэффициент увеличения. Широкий диапазон реализуемых в ПЭМ увеличений приводит к необходимости использования для калибровки коэффициента увеличения различных по структуре и технологии изготовления тест-объектов, каждый из которых применяют в своем диапазоне увеличений. В области увеличений порядка 20 000 крат применяют латексные сферы или реплики с дифракционных решеток [1], например образец "Cross Grating Replica" #02902-AB фирмы SPI, имеющий ячеистую структуру со средним размером ячейки 0,463 мкм. При увеличениях свыше 100 000 применяют тонкие срезы монокристаллов, или проводят калибровку по кристаллической решетке Au.

Существующие тест-объекты имеют ряд недостатков [2]. Так, в частности, латексные сферы подвержены радиационным повреждениям, существенным является также изменение размеров вследствие контаминации. Недостатком реплик с решеток является эффект "провисания" реплики в пределах ячейки поддерживающей сеточки. Кроме того, аттестованным является средний период между штрихами, при этом конкретное расстояние между соседними элементами может различаться ввиду неровности края.

В настоящей статье приводятся результаты исследований процесса калибровки ПЭМ с помощью стандартного образца, созданного в ОАО "НИЦПВ". В качестве параметра, характеризующего процесс калибровки, используется расширенная неопределенность измерений при калибровке с доверительной вероятностью $P = 0,95$ (коэффициент охвата $k = 2$).

Описание средства калибровки

В ОАО "НИЦПВ" разработан СО для калибровки ПЭМ, тип которого утвержден под названием "Стандартный образец параметров шаговой структуры в тонком слое монокристаллического кремния, ГСО 10030—2011". Данный СО предназначен для определения при калибровке коэффициента увеличения ПЭМ в диапазоне увеличений от 1000 до 1 500 000 крат. В диапазоне увеличений до 100 000 крат калибровка проводится по значению одного или нескольких шагов шаговой структуры, при увеличениях более 100 000 крат калибровка выполняется в режиме визуализации кристаллической структуры ГСО по значению расстояния между плоскостями (111) кремния.

Стандартный образец представляет собой тонкий поперечный срез рельефной шаговой структуры в монокристаллическом кремнии, изготовленный методом вырезания сфокусированным ионным пучком в электронно-ионном микроскопе. В качестве

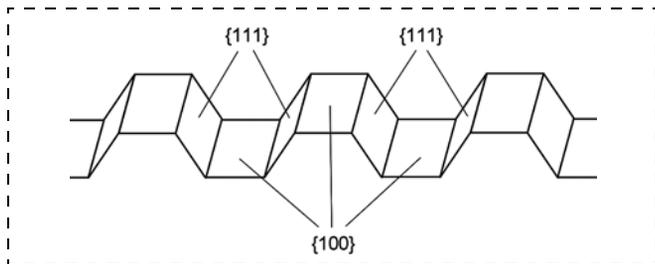


Рис. 1. Схематическое изображение рельефной шаговой структуры

рельефной шаговой структуры используется изготовленная по технологии микроэлектроники шаговая структура на поверхности кремния [3], плоскость которой совпадает с кристаллографической плоскостью (100).

Рельефную шаговую структуру изготавливают анизотропным травлением кремния в 5 %-ном растворе КОН через маску из оксида, сформированную литографическим способом с последующим плазмохимическим травлением. В результате травления профиль каждого выступа имеет форму трапеции с равными боковыми сторонами, а угол наклона боковой стороны относительно нижнего основания равен углу φ между кристаллографическими плоскостями (100) и (111). Схематическое изображение рельефной шаговой структуры представлено на рис. 1. Глубина рельефа определяется временем травления и может быть задана в диапазоне 100...1500 нм.

Поперечный срез формируется вдоль плоскости (110), перпендикулярной направлению выступов рельефной структуры, и включает не менее пяти выступов, образующих шаговую структуру.

Боковые грани поперечного среза дополнительно обрабатывают скользящим пучком низкоэнергетических ионов для удаления нарушенного слоя и в результате толщина изготовленного поперечного среза не превышает 50 нм.

Подготовленный поперечный срез переносят с помощью микроманипулятора на стандартный держатель образцов для просвечивающего электронного микроскопа.

Аттестуемыми характеристиками данного СО являются:

- значения шага T_i шаговой структуры ($i = 1, 2, \dots, N$), $4 \leq N \leq 9$;
- расстояние d_{111} между плоскостями (111) монокристаллического кремния в материале СО.

Шаг шаговой структуры T_i определяется по формуле $T_i = (T_{iл} + T_{iп})/2$, где $T_{iл}$ — расстояние между левыми вершинами выступов с номерами i и $i + 1$; $T_{iп}$ — расстояние между правыми вершинами выступов с номерами i и $i + 1$.

Изготовление экземпляров СО осуществляли из двух типов образцов рельефной шаговой структуры в кремнии с номинальными значениями шага 2 мкм и 0,5 мкм методом вырезания сфокусированным

ионным пучком с помощью электронно-ионного микроскопа ЛВ-4500. Предварительно участок поверхности рельефной структуры запыляли углеродом электронно-индуцированным, а затем ионно-индуцированным методами, так что общая толщина защитного слоя углерода составила примерно 1 мкм. ПЭМ-изображение изготовленной шаговой структуры, включающей пять выступов с номинальным значением шага 2 мкм, представлено на рис. 2.

Изображение участка выступа вблизи угла при верхнем основании, полученное при высоком увеличении ПЭМ в режиме прямого разрешения кристаллической структуры, представлено на рис. 3, где горизонтальная грань соответствует верхнему основанию выступа. Из рис. 3 видно, что боковая грань выступа ориентирована параллельно плоскостям (111) кристаллической решетки кремния.

Установление числовых значений шага шаговой структуры СО проводится с помощью растрового электронного микроскопа JSM-7401F, увеличение которого предварительно определяется с помощью меры ширины и периода специальной МШПС-2.0К.

Установление числового значения расстояния d_{111} между плоскостями (111) монокристаллического кремния в материале СО проводится с помо-

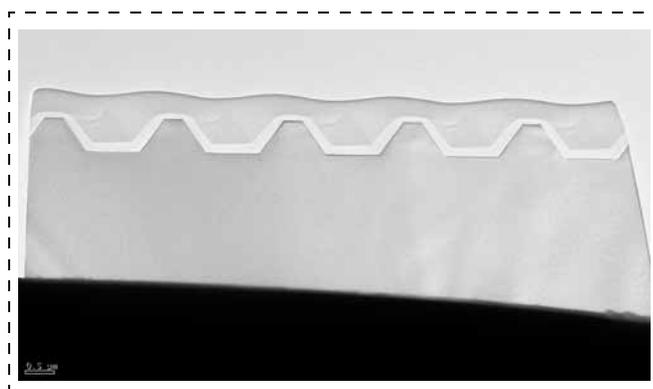


Рис. 2. ПЭМ-изображение шаговой структуры ГСО 10030—2011 с номинальным значением шага 2 мкм

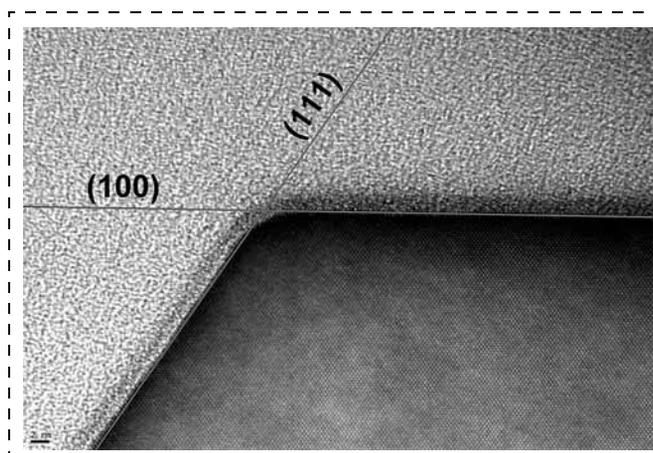


Рис. 3. ПЭМ-изображение участка выступа шаговой структуры вблизи угла при верхнем основании

**Нормированные метрологические характеристики
ГСО № 10030—2011**

Аттестуемая характеристика СО	Диапазон допускаемых аттестованных значений, нм	Границы допускаемых значений абсолютной погрешности при $P = 0,95$ нм
Шаг шаговой структуры T_i ($i = 1, 2, \dots, N$, $4 \leq N \leq 9$)	400...2100	± 1
Расстояние d_{111} между плоскостями (111) монокристаллического кремния в материале СО	0,3120...0,3150	$\pm 0,0005$

щью рентгеновского дифрактометра D8 DISCOVER на участке кремниевой пластины, из которой ионным пучком вырезают поперечный срез шаговой структуры. Рентгеновский дифрактометр предварительно калибруют с помощью тестового образца — ГСО дифракционных свойств кристаллической решетки (оксид алюминия) ГСО № 9464—2009.

Нормированные метрологические характеристики ГСО № 10030—2011 указаны выше в таблице.

Исследование процесса калибровки просвечивающего электронного микроскопа

Исследование характеристик процесса калибровки просвечивающего электронного микроскопа проводили на примере ПЭМ JEM-2100 с помощью экземпляра разработанного ГСО 10030—2011, имеющего номинальное значение шага 500 нм. При калибровке определяли увеличение с номинальным значением 30 000 крат. Используемый в наших экспериментах ПЭМ JEM-2100 оснащен ПЗС-камерой размерностью 11 мегапикселей и программным обеспечением "Digital Micrograph" для проведения измерений линейных размеров и калибровки ПЭМ.

Данное программное обеспечение позволяет использовать для калибровки только результат одного измерения элемента с известным (аттестованным) размером. Поэтому для уменьшения вклада случайной составляющей ошибки измерения в результат калибровки были проведены подготовительные измерения, которые включали серию из

$N = 10$ измерений значений одного шага СО при увеличении 30 000 крат, где каждое измерение включало юстировку образца по Z-координате, запись изображения на ПЗС-камеру и фиксацию результата отдельного измерения L_i . Далее по результатам $N = 10$ измерений было определено среднее значение L_{cp} , среднее квадратическое отклонение среднего значения СКО = 1,2 нм и поправочный коэффициент для осуществления процедуры калибровки, который является итогом подготовительных измерений:

$$K = L_{att}/L_{cp}$$

Процедуру калибровки проводили по изображению последнего измерения, результат последнего измерения L_{10} , умножали на поправочный коэффициент K и полученное значение вводили в программу в качестве аттестованного значения.

Расширенная (коэффициент охвата $k = 2$) относительная неопределенность измерений при калибровке, полученной с учетом вкладов погрешности аттестованного значения ГСО и статистического разброса результатов измерений, составила $U = 0,5 \%$.

Заключение

Проведена калибровка ПЭМ JEM-2100 с помощью ГСО 10030—2011 при номинальном значении увеличения 30 000 крат. Относительная расширенная (коэффициент охвата $k = 2$) неопределенность измерений при калибровке составила 0,5 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 16.552.11.7038) с использованием оборудования ЦКП НИЦПВ в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы".

Список литературы

1. Утевский Л. М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. М.: Металлургия, 1973. 31 с.
2. Williams D., Carter C. Transmission Electron Microscopy. A textbook for Materials Science. New York: Springer Science + Business Media, 2009. 164 p.
3. Новиков Ю. А., Озерин Ю. В., Плотников Ю. И., Раков А. В., Тодуа П. А. Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазонов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии // Труды ИОФАН. 2006. Т. 62. С. 36—76.

УДК 621.382.323

Д. С. Пономарев, мл. науч. сотр.,
e-mail: ponomarev_dmitr@mail.ru,
Институт сверхвысокочастотной
полупроводниковой электроники Российской
академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

РАЗРАБОТКА НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР InAlAs/InGaAs/InAlAs НА ПОДЛОЖКАХ ФОСФИДА ИНДИЯ

Поступила в редакцию 25.07.2012

Теоретически и экспериментально изучены зонные диаграммы наногетероструктур InAlAs/InGaAs/InP с однородной и составной квантовой ямой (КЯ). Разработан полевой транзистор с частотой усиления по току 110 ГГц.

Ключевые слова: наногетероструктура, A3B5, молекулярно-лучевая эпитаксия, полевой транзистор с затвором Шоттки

Введение

Одним из преимуществ использования гетеросистем InAlAs/InGaAs/InAlAs/InP по сравнению с другими арсенидными гетеросистемами является возможность получения более высокой дрейфовой скорости насыщения электронов $V_{др.нас}$ в квантовой яме (КЯ) InGaAs. Это дает возможность применять их при создании транзисторов сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона с рекордно высокими частотами усиления по току f_t [1] и низкими шумовыми характеристиками [2]. В сильных электростатических полях $E \sim 10^5$ В/см энергия электронов становится сравнимой с энергией полярных оптических фононов (ЛО), что приводит к дополнительной фоновой эмиссии и возрастанию темпа рассеяния "горячих" электронов. В результате такого процесса "горячие" электроны теряют часть своей энергии, вследствие чего средняя дрейфовая скорость выходит на насыщение и определяется выражением

$$V_{др.нас} = \sqrt{\frac{2E_{оф}}{m^*}}, \quad (1)$$

где $E_{оф}$ — энергия оптического фонона; m^* — эффективная масса носителей в КЯ.

Использование гетеросистемы InAlAs/In_xGa_{1-x}As/InAlAs позволяет уменьшить эффективную массу носителей за счет увеличения глубины КЯ, однако последовательное увеличение мольной доли x (InAs) приводит к возникновению механического напряжения в структуре при приближении к критической толщине эпитаксиального слоя [3]. Поэтому ключевым параметром при разработке конструкции наногетероструктуры является дизайн активного слоя, который должен обеспечивать как можно меньшую эффективную массу носителей в канале.

В настоящей работе проводилось комплексное исследование электронного транспорта в наногетероструктурах InAlAs/InGaAs/InAlAs на подложках InP с однородной (ОКЯ) и составной (СКЯ) квантовой ямой InCaAs с одной и несколькими гетеровставками нелегированного InAs. Было показано, что введение двух вставок InAs позволяет уменьшить эффективную массу электронов в КЯ на 26 % по сравнению с решеточно-согласованной ОКЯ In_{0,53}Ga_{0,47}As и на 17 % по сравнению с СКЯ с одной центральной вставкой InAs. Разработан полевой транзистор на основе наногетероструктуры с ОКЯ In_{0,53}Ga_{0,47}As/In_{0,52}Al_{0,48}As/InP, в котором достигнута $f_t = 110$ ГГц при крутизне 1000 мСм/мм.

Моделирование профиля дна зоны проводимости и расчет эффективной массы электронов

Расчетное моделирование зонной структуры проводилось с помощью решения самосогласованной системы уравнений Шредингера и Пуассона в приближении эффективной массы [4]. Согласно данным, наиболее часто встречающимся в литературе, использованы следующие значения эффективных масс на дне зоны проводимости в Γ -долине: в InAs — $m^* = 0,03m_0$ [5], в In_{0,53}Ga_{0,47}As — $m^* = 0,043m_0$ и в InAlAs — $m^* = 0,075m_0$ [6, 7]. Разрывы дна зон проводимости принимались равными $\Delta E_c = -0,7$ эВ между InGaAs/InAlAs и $\Delta E_c = -0,45$ эВ между InGaAs/InAs [8, 9]. Значение поверхностного потенциала для всех гетероструктур принималось равным $\phi_s = 0,5$ эВ. Все расчеты проводились для температуры 300 К.

Вследствие того, что эпитаксиальные слои InAs являются напряженными по отношению к слою In_{0,53}Ga_{0,47}As, электронная подвижность продолжает увеличиваться вплоть до некоторой критической толщины вставки InAs. Таким образом, необходимо, во-первых, постепенно увеличивать толщину

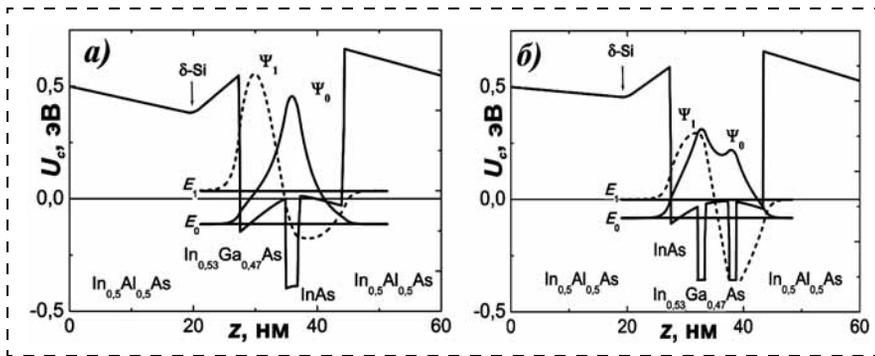


Рис. 1. Зона проводимости U_c и профили ВФ электронов Ψ_i (i — номер подзоны) в СКЯ, содержащей одну (а) и две (б) нановставки InAs с односторонним δ -легированием кремнием. Нуль энергии отчитывается от уровня Ферми

ну вставки InAs в СКЯ и сохранять эффективную ширину слоя СКЯ D_{eff} , определяемую как квадрат волновой функции (ВФ) в нижней подзоне, достаточно большой, а, во-вторых — избегать релаксации механической деформации в области напряженных нановставок. Чтобы удовлетворить этим параметрам, был промоделирован и выращен образец с двумя тонкими вставками InAs в СКЯ. На рис. 1 приведены зонные диаграммы структуры с СКЯ, содержащих одну (а) и две (б) вставки InAs.

Видно, что при введении достаточно широкой вставки InAs уровень энергии электронов нижней

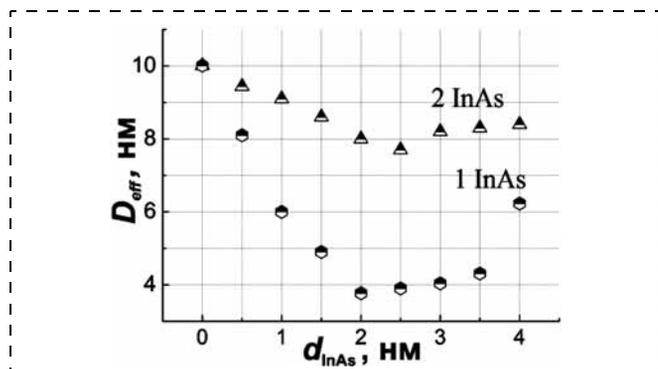


Рис. 2. Зависимость эффективной ширины для случая одной и двух вставок InAs в СКЯ InGaAs/InAs

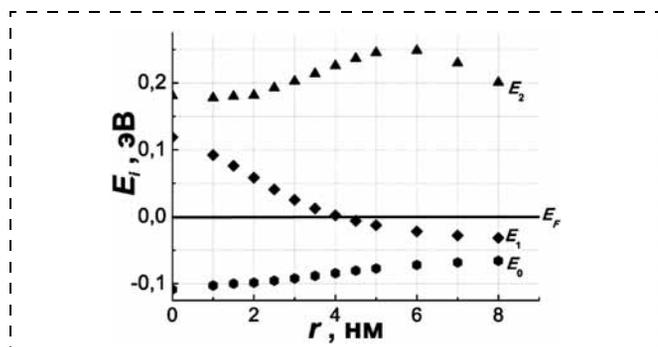


Рис. 3. Зависимость энергии первых трех подзон от расстояния между вставками InAs

подзоны размерного квантования E_0 понижается относительно дна КЯ и выделяется в самостоятельный уровень, связанный преимущественно со вставкой. При этом эффективная ширина КЯ, определяемая как полуширина ВФ электронов в нижней подзоне размерного квантования E_0 , уменьшается, способствуя тем самым усилению локализации электронов в активном слое. На это указывает и увеличение энергетического зазора между уровнями энергии подзон E_0 и E_1 .

В составной яме с двумя вставками InAs ВФ электронов не являются локализованными в области одной из вставок в отличие от случая одиночной вставки InAs, а по причине достаточно большого расстояния между вставками распространяются на область, сравнимую с полной шириной КЯ (рис. 2).

Тем не менее, как видно из рис. 1, возникает усиление амплитуд ВФ в области нановставок, что приводит к снижению эффективной массы электронов в СКЯ. Стоит, однако, отметить, что значение эффективной ширины КЯ зависит от выбранного расстояния r между вставками InAs и от профиля потенциала СКЯ в целом (рис. 3). Одним из вариантов такого расположения нанослоев InAs является рост вставок достаточно близко к стенкам СКЯ. Видно, что по мере увеличения расстояния между вставками уровень энергии E_1 начинает понижаться относительно дна зоны проводимости и при $r \geq 4$ нм вторая подзона размерного квантования становится вырожденной. При введении одиночной вставки InAs (это случай $r = 0$ нм) уровни энергий подзон размерного квантования разнесены по отношению друг к другу и эффективная ширина СКЯ мала.

Расчет эффективных масс m^* проводился исходя из соотношения вероятностей для электрона находиться в той или иной пространственной области КЯ и определялся согласно выражению

$$m^*/m_0 = \frac{\int m^*(z)/m_0 \Psi(z) \Psi^*(z) dz}{\int \Psi(z) \Psi^*(z) dz}, \quad (2)$$

где $m^*(z)/m_0$ — кусочная функция, отражающая значения m^* по разным слоям гетероструктуры; m_0 — масса свободного электрона; $\Psi(z)$ и $\Psi^*(z)$ — ВФ и комплексно сопряженная ВФ электронов соответственно. Расчетные данные приведены в таблице.

Расчитанные значения эффективных масс электронов m^*

Образец	m^*
ОКЯ ($x = 0,53$)	0,043
СКЯ + 1 вставка InAs ($d_{InAs} = 3,2$ нм)	0,041
СКЯ + 2 вставки InAs ($d_{InAs} = 1,2$ нм)	0,038

Рост образцов наногетероструктур

Все образцы для измерений, а также приборные структуры были выращены в ИСВЧПЭ РАН на установке молекулярно-лучевой эпитаксии ЦНА-24. Первая серия образцов с ОКЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ имела ширину ямы 18 нм для образцов № 1 ($x = 0,53$) и № 2 ($x = 0,65$) и 16 нм для образца № 3 ($x = 0,7$). Стоит отметить, что ширина КЯ была намеренно снижена в образце № 3 во избежание превышения критической толщины эпитаксиального слоя и зарождения дислокаций несоответствия. Температура роста всех слоев составляла 510°C , а степень δ -легирования кремнием $N_{\delta 1} = 7,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ для всех образцов. Толщина спейсерного слоя $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ составляла 3; 3,5 и 4 нм для образцов № 1, 2 и 3 соответственно.

Вторая серия образцов с двухсторонним δ -легированием кремнием с $N_{\delta 1} = 0,88 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $N_{\delta 2} = 2,9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (для нижнего и верхнего δ -слоев, соответственно) имела СКЯ $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InAs}$ со вставкой InAs с толщиной 1,8...4,2 нм при суммарной ширине КЯ 16,8 нм.

Третья серия образцов имела одностороннее δ -легирование кремнием $N_{\delta 1} = 2,72 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и СКЯ с двумя вставками InAs толщиной 1,2 нм при суммарной ширине КЯ 15,9 нм. Отметим, что температура роста слоев при эпитаксиальном росте составных ям была пониженной и составляла 430°C .

Измерение эффективных масс электронов в образцах с ОКЯ и КЯ с одной вставкой InAs проводилось согласно выражению [10]

$$m^*(x) = 0,063 - 0,040x \quad (3)$$

и показало, что относительное изменение m^* при переходе от $x = 0,53$ до 0,7 составляет не более 12 %. При этом введение центральной вставки InAs в КЯ позволяет уменьшить m^* за счет усиления локализации электронов в области вставки и при этом не превысить критическую толщину [11]. Таким образом, в структуре с введенным в КЯ $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ одиночным слоем InAs с толщиной 3,2...4,3 нм удалось добиться уменьшения эффективной массы на ~17 % по сравнению с ОКЯ $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$.

Определение эффективных масс в образцах с СКЯ $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InAs}$ с двумя вставками InAs проводилось с помощью измерения спектров осцилляции продольного магнетосопротивления в квантующем магнитном поле [12]. Для сравнительного анализа были также измерены структуры с ОКЯ. При этом оказалось, что введение двух слоев InAs толщиной 1,2 нм приводит к значительному уменьшению m^* на 26 % по сравнению с эффективной массой электронов в ОКЯ $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$.

Изготовление транзистора с активной областью $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$

Приборная изоляция осуществлялась вытравливанием мезаструктуры на глубину 0,1 мкм не селективным жидкостным травителем состава $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (3:2:50), обеспечивающим гладкую поверхность вытравленной структуры и при-

емлемую скорость травления. Перед началом травления проводилась очистка поверхности пластины в кислородной плазме.

Омические контакты напылялись в вакууме и имели состав $\text{Ni}/\text{Ge}/\text{Au}/\text{Ni}/\text{Au}$ (8/8/30/14/200 нм). Перед напылением поверхность пластины подвергалась обработке в кислородной плазме ВЧ разряда при давлении 1 Торр в течение 1,5 мин для удаления остатков углеводородов. Затем непосредственно перед загрузкой в камеру установки напыления пластина подвергалась травлению в растворе аммиака в воде (10 %) в течение 1 мин для удаления образовавшихся и естественных оксидов. Напыление осуществлялось в установке термического напыления металлов в безмасляном вакууме при давлении остаточных газов не выше $2 \cdot 10^{-7}$ Торр.

Подгонка токов транзисторов проводилась в селективном травителе на основе янтарной кислоты (ЯК) состава ЯК: $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (1:5:10) после предварительной обработки в кислородной плазме в течение 30 с.

Непосредственно перед загрузкой в камеру напыления металлов для формирования затвора поверхность пластины (проявленных участков) подвергалась травлению потоком ионов Ag^+ энергией 50 эВ в течение 1...2 мин для улучшения адгезии затворов. В качестве металла затворов применялась система $\text{Ti}/\text{Pd}/\text{Au}$ (80/40/400 нм). Взрыв металла после напыления осуществлялся в ацетоне без использования ультразвука.

Все вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзисторов исследовались на характеристикографе Tektronix 370A непосредственно на пластине. Измерения С-V-затворных характеристик выполнялись с помощью прецизионного LCR-измерителя Hewlett Packard 4284A. Анализ ВАХ показал, что транзисторы на основе псевдоморфных наногетероструктур с повышенным содержанием индия ($x > 0,6$) обладают наибольшими значениями крутизны и начальных токов, достигающих $G_m = 1000 \text{ мСм/мм}$ и 900 мА/мм соответственно. Напряжение отсечки транзисторов $U_{\text{отс}}$ составляло от $-0,8$ до -1 В .

Входные ВАХ затвора приведены на рис. 4. Видно, что разброс входных характеристик довольно боль-

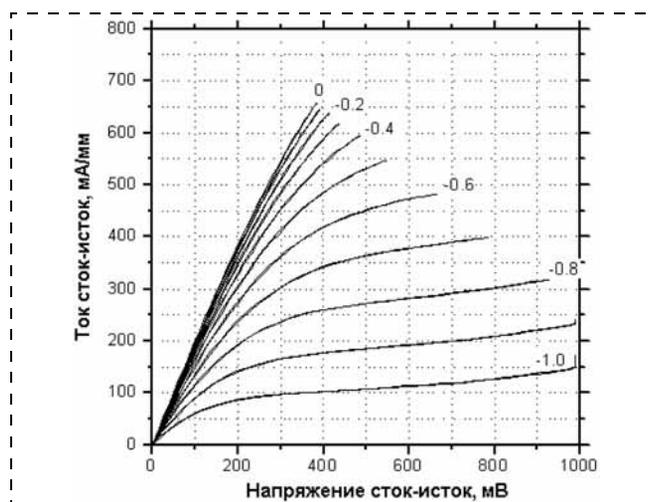


Рис. 4. ВАХ транзисторов на псевдоморфных наногетероструктурах

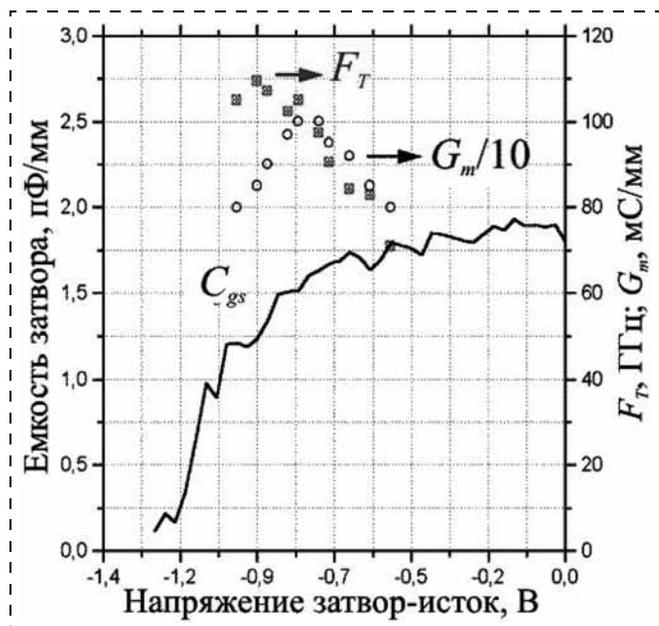


Рис. 5. Зависимость крутизны, емкости затвора C_{gs} и частоты отсечки f_t PHEMT-транзистора на подложке InP от напряжения затвор—исток

шой. Есть транзисторы с затворами без всяких утечек, основная масса — утечка на уровне 10...20 мкА. Транзисторы имели ширину 60 мкм и обладали крутизной $G_m = 1000$ мСм/мм (при напряжении стока $U_c > 0,5$ В) при начальном токе стока $I_c = 900$ мА/мм (при $U_c = 1,0$ В).

Для оценки СВЧ характеристик изготовленных транзисторов были измерены входные С—V характеристики затвора транзисторов на пластине затвора 2×30 мкм (рис. 5). Отметим, что емкость затвора в активной области работы транзистора не превосходит 1,5 пФ. Крутизна характеристики G_m достигает значения 750 мСм/мм на изоморфной гетероструктуре и 1000 мСм/мм на псевдоморфной гетероструктуре (среднее значение для измеренных транзисторов). Величина f_t рассчитывалась согласно выражению

$$f_t = G_m / (2\pi C_{gs}), \quad (4)$$

где C_{gs} — емкость между затвором и истоком транзистора. Значение f_t составило 110 ГГц.

Отметим, что подобная оценка f_t носит приближенный характер, поскольку в данную формулу следует подставлять внутреннюю крутизну и емкость затвор—канал меньшую, чем полная емкость затвора. Более точно величина f_t может быть получена после обработки результатов измерений S-параметров транзистора в диапазоне частот по крайней мере до 60 Гц, что не представляется возможным ввиду отсутствия соответствующего оборудования.

Выводы

В работе теоретически и экспериментально изучены зонная структура и электрофизические свой-

ства на гетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs/InP с одиночной и составной квантовой ямой InGaAs с одной и несколькими гетеровставками нелегированного InAs. Созданная конструкция гетероструктуры с двумя симметрично расположенными в квантовой яме нановставками InAs (толщиной 1,2 нм каждая) позволяет уменьшить эффективную массу электронов на 26 % по сравнению с решеточно-согласованной ОКЯ $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$.

Разработан полевой транзистор на основе наногетероструктуры с ОКЯ $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,18}\text{As}$, в котором достигнута $f_t = 110$ ГГц при крутизне 1000 мСм/мм и начальном токе 900 мА/мм.

Работа выполнена по заказу Минобрнауки России в рамках государственного контракта № 14.740.11.0136 от "13" сентября 2010 г.

Список литературы

1. Kim T.-W., Kim D.-H., del Alamo J. A. 60 nm self-aligned-gate InGaAs HEMTs with record high-frequency characteristics // Proc. IEEE International Electron Devices Meeting. 2010. P. 696.
2. Kim D.-H., del Alamo J. A. 30-nm InAs PHEMTs with $f_T = 644$ GHz and $f_{\text{max}} = 681$ GHz // IEEE Electron Device Letters. 2010. Vol. 31. N 8. P. 806.
3. Matthews J. W., Blakeslee A. E. Defects in epitaxial multilayers. II. Dislocation pileups, threading dislocations, slip lines and cracks // J. Cryst. Growth. 1974. Vol. 118. P. 27.
4. Галиев Г. Б., Васильевский И. С., Климов Е. А., Мокеров В. Г., Черечукин А. А. Влияние температуры роста спейсерного слоя на подвижность двумерного электронного газа в PHEMT-структурах // ФТП. 2006. Т. 40. В. 12. С. 1479.
5. Аверкиев Н. С., Березовец В. А., Михайлова М. П., Моисеев К. Д., Нижанковский В. И., Парфеньев Р. В., Романов К. С. Особенности энергетического спектра и квантового магнетотранспорта в гетеропереходах II типа // ФТП. 2004. Т. 46. Вып. 11. С. 2083.
6. Kim T., Jung M., Yoo K. H. Spin dependence of electron effective masses in InGaAs/InAlAs quantum well // J. Phys. Chem. Solid. 2002. Vol. 61. P. 1769.
7. Kim T., Choo D., Yoo K., Meining C., McCombe B. Electronic Parameters and Electronic Structures in Modulation-doped Highly Strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ Coupled Double Quantum Wells // Sol. Stat. Comm. 2004. Vol. 129. P. 334.
8. Korf R. F., Wei H. P., Perley A. P., Livescu G. Electron effective mass and band-gap dependence on alloy composition of $\text{Al}_y\text{Ga}_x\text{In}_{1-y-x}\text{As}$, lattice matched to InP // Appl. Phys. Lett. 1992. Vol. 60. N 19. P. 2386.
9. Chen W., Fritze M., Walecki W., Ackley P., Nurmikko A. V., Hong M., Chang L. L. Excitonic Enhancement of the Fermi-edge Singularity in Dense Two-Dimensional Electron Systems // Phys. Rev. B. 1992. Vol. 45. P. 8464.
10. Nakwaski W. Effective masses of electrons and heavy holes in GaAs, InAs, AlAs and their ternary compounds // Phys. B. 1995. Vol. 210. P. 1.
11. Kulbachinskii V. A., Yuzeeva N. A., Galiev G. B., Klimov E. A., Vasil'evskii I. S., Khabibullin R. A., Ponomarev D. S. Electron effective masses in an InGaAs quantum well with InAs and GaAs inserts // Semicond. Sci. Tech. 2012. Vol. 27. N 3. P. 035021.
12. Пonomarev Д. С., Васильевский И. С., Галиев Г. Б., Климов Е. А., Хабибуллин Р. А., Кульбачинский В. А., Юзева Н. А. Подвижность и эффективная масса электронов в составных квантовых ямах InGaAs с нановставками InAs и GaAs // ФТП. 2011. Т. 46. Вып. 4. С. 500.

А. В. Минаков¹, канд. физ.-мат. наук, доц.,
e-mail: Tov-andrey@yandex.ru,

А. А. Ягодницына², аспирант,
e-mail: yagodnitsinaaa@gmail.com,

А. С. Лобасов¹, аспирант,
e-mail: perpetutyzs@mail.ru,

В. Я. Рудяк³, д-р физ.-мат. наук, проф.,
зав. каф., e-mail: valery.rudyak@mail.ru,

А. В. Бильский², канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.,
e-mail: bilsky@itp.nsc.ru

¹ Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск

² Институт теплофизики Сибирского отделения
РАН им. С. С. Кутателадзе, г. Новосибирск

³ Новосибирский государственный архитектурно-
строительный университет

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В Т-ОБРАЗНОМ МИКРОКАНАЛЕ

Поступила в редакцию 11.08.2012

С помощью численного моделирования и экспериментальных методов $\mu\text{-PIV}$ и $\mu\text{-LIF}$ исследованы режимы течения и смешения жидкостей в микромиксере Т-типа в широком диапазоне значений числа Рейнольдса. Исследована структура течения и ее влияние на смешение. Получены зависимости коэффициента трения и эффективности смешения от числа Рейнольдса. Показано резкое увеличение эффективности смешения при переходе течения с симметричного на несимметричный режим при стационарном течении.

Ключевые слова: микроканалы, МЭМС-технологии, $\mu\text{-PIV}$, $\mu\text{-LIF}$, вычислительная гидродинамика

Введение

В последнее время в связи с большим интересом общественности к энергосбережению стала актуальной минитюаризация технологических устройств. Микротематика стала интенсивно развивающейся и перспективной областью исследований. Микроканальные устройства широко применяются в различных областях науки и техники в качестве микротеплообменников, микросмесителей, микрофильтров и т. д. Для работы большинства микроканальных устройств, применяемых в химии и биологии, необходимо быстрое и эффективное перемешивание веществ. Однако течение в микроканалах является преимущественно ламинарным, и перемешивание происходит посредством диффузии, а значит, очень медленно. Поэтому создание и оптимизация микромиксеров с наименьшим временем перемешивания является актуальной задачей в области разработки микроканальных устройств.

Микромиксеры Т-типа являются наиболее простой в изготовлении и эффективной формой микро-

миксеров. Режимы течения в микромиксерах, возникающие при малых числах Рейнольдса, систематически ранее уже изучались во многих работах [1–3]. Благодаря применению численного моделирования и ряда новых способов управления потоком удалось добиться существенного увеличения эффективности смешения в наиболее распространенных на сегодняшний день Y-, T- и S-микромиксерах. При этом число Рейнольдса варьировалось в типичном для микроканалов диапазоне от 0,01 до 10.

В представленной работе были исследованы режимы течения и смешения жидкостей в T-образном микроканале при более высоких числах Рейнольдса — до 1000.

Описание математической модели и экспериментальной установки

В работе рассматриваются несжимаемые течения многокомпонентных ньютоновских жидкостей, для описания которых используется гидродинамический подход, основанный на решении уравнений Навье—Стокса, дополненных уравнениями переноса и диффузии компонентов. В настоящее время в многочисленных экспериментах установлено, что для жидкостей такое описание хорошо "работает" вплоть до размеров каналов 1 мкм. В качестве граничных условий на стенках каналов для компонент вектора скорости используются условия прилипания. Для решения описанной выше системы уравнений использовался программный комплекс для задач вычислительной гидродинамики σFlow [2–3].

Изучение течения и смешения было проведено для микроканала Т-типа. Ширина узкой части канала 200 мкм, ширина широкой части 400 мкм, толщина канала 200 мкм, длина канала смешения 3000 мкм. На твердых стенках заданы условия прилипания. Задача рассматривается в пространственной и, в общем случае, нестационарной постановке. Через левый вход канала подается чистая вода с расходом Q . Через правый вход канала подается вода, подкрашенная родамином, с тем же самым расходом. Исследование было проведено для различных значений числа Рейнольдса, которое определялось следующим образом:

$$\text{Re} = \frac{\rho U d_h}{\mu},$$

где $U = Q/(2\rho H^2)$ — среднерасходная скорость в канале смешения; $H = 200$ мкм — высота канала; $d_h = 267$ мкм — гидравлический диаметр.

Для количественной характеристики эффективности смешения был использован параметр $M = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_0}}$ — эффективность смешения, где $\sigma = \frac{1}{V} \times \int_V (f - \bar{f})^2 dV$ — среднеквадратичное по объему миксера V отклонение концентрации компонента f от его среднего значения \bar{f} ; $\sigma_0 = \bar{f}(1 - \bar{f})$ — максимальное среднеквадратичное отклонение.

Для проведения экспериментов использовалась следующая установка. Система формирования изображения состояла из эпифлуоресцентного инвертированного микроскопа (Carl Zeiss AxioObserver.Z1) с объективами $20\times/NA = 0,3$ и $5\times/NA = 0,12$ для проведения *micro-PIV* и *micro-LIF* экспериментов соответственно. Освещение и запись изображений на цифровую камеру проводились с помощью измерительного комплекса "ПОЛИС", который состоит из следующих основных элементов. Двойной импульсный Nd:YAG лазер с энергией в импульсе 50 мДж, длиной волны 532 нм и частотой повторения импульсов 8 Гц освещал поток через объектив микроскопа. Для ввода излучения в микроскоп использовался жидкий световод и блок сопряжения волокна с оптическим трактом микроскопа. Кросскорреляционная цифровая камера регистрировала изображения с разрешением 2048×2048 пикселей, которые затем передавались в персональный компьютер для обработки. Синхронизация работы системы осуществлялась с помощью программируемого процессора. Управление экспериментом и обработка данных осуществлялись с использованием пакета программного обеспечения ActualFlow [4, 5].

Управление движением жидкости осуществлялось с помощью инфузионного шприцевого насоса с регулируемым расходом жидкости. Поток жидкости засеивался флуоресцентными трассерами фирмы Thermo Scientific. Частицы состояли из полимера, маркированного флуоресцентным красителем Родамин Б. Плотность частиц $1,05 \text{ г/см}^3$, средний диаметр 2 мкм, стандартное отклонение 0,04 мкм. Для регистрации света, излученного частицами, и подавления света, отраженного от канала, использовался стетоделительный куб, состоящий из диоичного зеркала и двух фильтров для возбуждения и регистрации Родамина Б.

В качестве осветителя для *micro-LIF*-измерений использовалась ртутная лампа. С помощью зеленого светофильтра из спектра излучения ртутной лампы "вырезалась" зеленая длина волны. Для регистрации света, излученного флуорофором Родамин 6Ж, и подавления отраженного света использовался светофильтр. Излучение флуорофора регистрировалось на цифровую камеру Видеоскан с разрешением 2048×2048 пикселей и динамическим диапазоном 12 бит.

Для калибровки измерений был определен диапазон концентраций, при котором интенсивность свечения флуорофора имеет линейную зависимость от концентрации. Для этого в Т-канал подавались водные растворы Родамин 6Ж в следующих концентрациях: 0, 10, 25, 40, 50, 62,5 и 75 мг/л. Для каждой концентрации флуорофора регистрировалось изображение канала. В результате было установлено, что при концентрации меньше 62,5 мг/л зависимость интенсивности излучения флуорофора от концентрации линейная. Таким образом, была получена связь между концентрацией флуорофора и интенсивностью изображения в каждой точке канала.

Результаты исследований

В расчетах число Рейнольдса варьировалось изменением расхода жидкости на входе в миксер в диапазоне от 1 до 1000. В качестве количественных параметров рассчитывались перепад давления между одним из входов и выходом из миксера, а также эффективность смешения.

Результаты расчетов течения при разных значениях числа Рейнольдса в Т-образном микроканале приведены на рис. 1 (см. третью сторону обложки). Структура течения в продольном и поперечном сечении миксера показана с помощью траекторий частиц маркеров.

Картина смешения в микромиксере для тех же значений числа Рейнольдса приведена на рис. 2 (см. третью сторону обложки). Перемешивание показано с помощью изолиний концентрации краски в четырех поперечных сечениях миксера. Первое слева сечение расположено на входе в канал смешения, второе сечение — на расстоянии 100 мкм от входа, третье — на расстоянии 200 мкм и четвертое — на расстоянии 400 мкм. На рисунках синий цвет соответствует чистой воде, красный цвет — воде, подкрашенной родамином. Как видно на рис. 1–2, для значений числа Рейнольдса порядка 1 наблюдается ползущее безвихревое течение с достаточно слабым перемешиванием краски. Эффективность смешения M для $Re = 1$ составляет порядка 3,2 % (рис. 3).

Далее с увеличением числа Рейнольдса в миксере формируется пара симметричных подковообразных вихрей, которые образуются у левой торцевой стенки миксера (рис. 4, а, см. четвертую сторону обложки) и распространяются в канал смешения на расстояние, зависящее от числа Рейнольдса. Подковообразные вихри появляются вследствие развития вторичных течений, обусловленных действием центробежной силы, связанной с поворотом потока. Такие вихри принято называть вихрями Дина. Подковообразная структура вихрей Дина показана на рис. 4 с помощью изоповерхности λ_2 . Как видно на рис. 1–2, течение в данном случае является симметричным относительно центральной продольной плоскости миксера. Каждая такая вихревая подкова, находясь в пределах одной жидкости, не

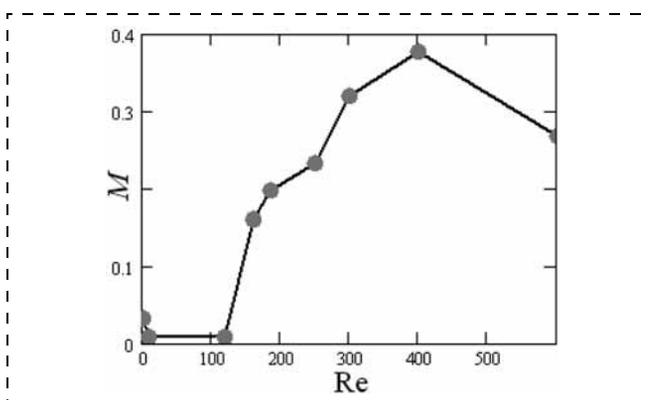


Рис. 3. Зависимость эффективности смешения от числа Рейнольдса

пересекает границы раздела смешивающихся сред, поэтому граница раздела сред остается практически плоской. И поскольку диффузионное число Пекле с ростом числа Рейнольдса возрастает, то эффективность смешения при этом уменьшается (рис. 3).

Качественное сравнение расчетных и экспериментальных полей скорости в центральном продольном сечении миксера для симметричных режимов течения показано на рис. 5 (см. четвертую сторону обложки). Как видно, наблюдается очень хорошее соответствие расчета и эксперимента.

При дальнейшем повышении числа Рейнольдса можно наблюдать очень интересную перестройку режима течения. Начиная со значения числа Рейнольдса примерно 150, из-за развития неустойчивости Кельвина—Гельмгольца пара подковообразных вихрей скачкообразно разворачивается на угол 45° к центральной продольной плоскости миксера. Данная перестройка течения хорошо видна на рис. 4 (см. четвертую сторону обложки). Неустойчивость Кельвина—Гельмгольца приводит к формированию диагонального сдвигового течения в поперечном сечении канала. Центром симметрии течения становится центральная продольная линия, проходящая по каналу смешения. Из-за такого опрокидывания течения происходит постепенное затухание одной ветви подковообразного вихря и увеличение интенсивности другой ветви. Течение имеет S-образную вихревую структуру (см. рис. 1, в). Удивительно, что при этом оно остается стационарным! Вследствие того, что интенсивность вихрей в несимметричном режиме течения существенно возрастает, они протягиваются по каналу смешения до самого выхода. Наличие закрутки потока в канале смешения приводит к образованию слоистой структуры из смешивающихся жидкостей (см. рис. 2, в). Поверхность контакта смешивающихся жидкостей в такой слоистой структуре очень развита, что приводит к резкому увеличению эффективности смешения ($M = 19,8\%$). Таким образом, при переходе течения от симметричного режима ($Re < 150$) к несимметричному ($Re > 150$) эффективность смешения возрастает в 25 раз (рис. 3). Это обстоятельство дает возможность использовать данный режим течения для крайне эффективного перемешивания жидкостей.

Для того чтобы провести сравнение полей концентраций, полученных в результате численного моделирования и эксперимента, было проведено пространственное осреднение расчетных данных по глубине T-миксера. Для осреднения были взяты поля концентраций в плоскости XY в 11 сечениях по глубине симметрично относительно центра T-миксера. Поля концентраций для каждого сечения пространственно усреднялись с помощью фильтра "бегущее среднее" с круглым окном с диаметром, равным диаметру функции рассеяния точки в данном сечении. Результирующее поле концентрации рассчитывалось как среднее арифметическое по 11 рассчитанным сечениям. Полученные с помощью численного моделирования усредненные поля концентрации и поля концентрации, полученные в эксперименте, для различных чисел Рейнольдса показаны

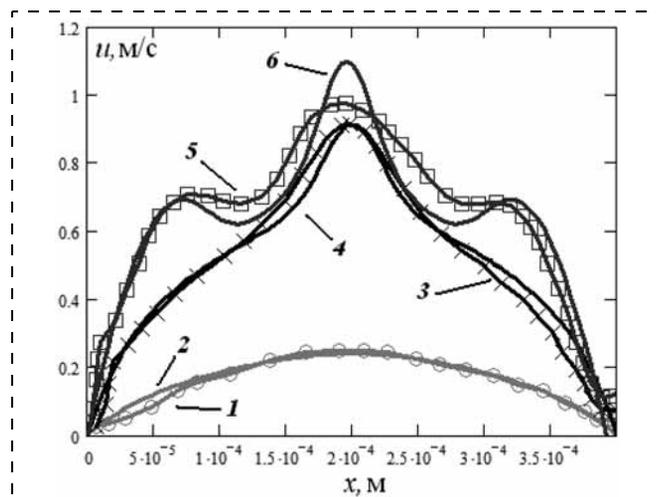


Рис. 7. Профили скорости в центральном поперечном сечении канала: 1 — $Re = 30$, эксперимент; 2 — $Re = 30$, расчет; 3 — $Re = 120$, эксперимент; 4 — $Re = 120$, расчет; 5 — $Re = 150$, эксперимент; 6 — $Re = 150$, расчет

на рис. 6 (см. четвертую сторону обложки). В целом наблюдается неплохое качественное согласование.

На рис. 7 показано сопоставление расчетных и экспериментальных профилей скорости в центральном сечении смешивающего канала на расстоянии 2,5 калибров от его входа.

По профилям скорости видно, что при числах Рейнольдса, больших 150, профиль скорости в канале меняется, появляются перегибы. Это связано с возникновением S-образной структуры в смешивающем канале. Анализ количественного сравнения результатов расчетов и экспериментов показывает, что расчет очень хорошо описывает данные эксперимента для значений числа Рейнольдса, равных 30 и 120, и несколько хуже для 150. Это связано с существенно трехмерной структурой потока при данном числе Рейнольдса. Наличие градиента продольной скорости по глубине канала привело к сглаживанию экспериментального профиля скорости в микромиксере.

Не претерпевая существенных изменений, описанная выше вихревая структура течения в стационарном состоянии существует в диапазоне чисел Рейнольдса от 140 до 240. Начиная со значения числа Рейнольдса, примерно равного 240, течение перестает быть стационарным. В диапазоне ($240 < Re < 400$) течение можно рассматривать как периодическое. При этом слоистая структура смешения, которая образовалась при $Re > 150$, в целом сохраняется, и благодаря поперечным колебаниям потока в нестационарном режиме течения эффективность смешения увеличивается еще сильнее, до $M = 37\%$ при $Re = 400$.

Начиная со значения числа Рейнольдса порядка 450, периодичность колебаний потока постепенно затухает. Течение становится сначала квазипериодическим ($450 < Re < 600$), а затем полностью хаотическим ($Re > 600$). Распределение кинетической энергии пульсаций потока по частотам показывает, что если для числа Рейнольдса 300 спектр представляет собой набор отдельных дискретных частот, соответствующих периодическому ламинарному режиму те-

чения, то для значения $Re = 600$ спектр можно рассматривать практически сплошным, в нем присутствует большое число частот, есть инерционный интервал, как в случае турбулентного течения. Такое раннее для течения в каналах начало турбулентности обусловлено развитием неустойчивости Кельвина—Гельмгольца во входном участке канала смешения. Результаты расчетов показывают, что при достаточном увеличении длины канала смешения, по мере удаления от места слияния потоков пульсации постепенно затухают, течение ламинаризуется.

Зависимость сопротивления канала смешения от числа Рейнольдса для данного миксера приведена на рис. 8. Для сопоставления с полученными результатами на графике штриховой линией приведены значения коэффициента трения для установившегося ламинарного течения в прямоугольном канале. Для канала с отношением высоты к ширине, равным 0,5, коэффициент трения близок к $64/Re$. При увеличении числа Рейнольдса значения коэффициента трения резко отклоняются от зависимости $64/Re$, что также свидетельствует о ламинарно-турбулентном переходе. Расчетные значения коэффициента трения в микромиксере в турбулентном режиме хорошо описываются зависимостью $1,8/Re^{0,25}$. Эта величина в 5,68 раз выше классической зависимости Блазиуса $0,316/Re^{0,25}$ для развитого турбулентного течения в прямом канале. Такое большое различие обусловлено и наличием поворота потоков на входе в канал, и закруткой потока в канале смешения.

При переходе к турбулентности S-образная вихревая структура, которая образовалась в канале смешения при $Re > 150$ и существовала в нестационарном режиме, разрушается. Течение распадается на множество достаточно крупных вихрей. Из-за этого уменьшается площадь контакта смешивающихся жидкостей, и вследствие этого при переходе к турбулентности смешение ухудшается ($M = 26\%$ для $Re = 600$).

Естественно, что при дальнейшем увеличении числа Рейнольдса появляется множество мелко-масштабных вихрей, которые очень хорошо перемешивают течение, и эффективность смешения в

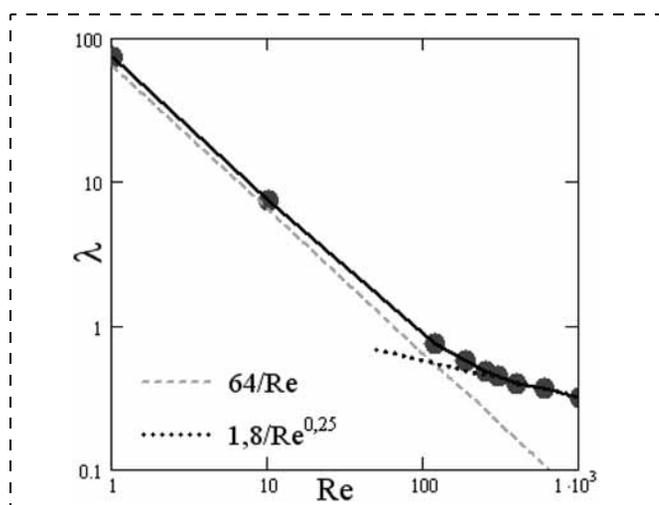


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения от числа Рейнольдса

развитом турбулентном течении намного превышает ламинарное значение.

Заключение

Были исследованы режимы течения и процессы перемешивания в микромиксере T-типа посредством численного моделирования и с помощью экспериментальных методов *micro-PIV* и *micro-LIF*. Поведение течения в рассмотренном T-образном микромиксере в зависимости от числа Рейнольдса можно условно разделить на следующие режимы:

- $Re < 5$ — стационарное безвихревое течение;
- $5 < Re < 150$ — стационарное вихревое симметричное течение;
- $150 < Re < 240$ — стационарное вихревое несимметричное течение;
- $240 < Re < 400$ — нестационарное периодическое течение;
- $400 < Re < 600$ — нестационарное квазипериодическое течение;
- $Re > 600$ — хаотическое течение, ламинарно-турбулентный переход.

Поведение смешения в микромиксере существенно зависит от режима течения. При $Re < 155$ с ростом числа Re эффективность смешения монотонно убывает в силу роста скорости потока и, соответственно, уменьшения времени пребывания жидкостей в миксере. В диапазоне $150 < Re < 240$ эффективность смешения многократно увеличивается вследствие образования слоистой S-образной структуры течения с развитой площадью поверхности контакта смешивающихся сред. В диапазоне чисел Рейнольдса $240 < Re < 400$ эффективность смешения увеличивается еще сильнее из-за поперечных колебаний потока в канале смешения. При $Re > 450$ эффективность смешения снижается вследствие разрушения слоистой структуры течения и уменьшения площади контакта смешивающихся жидкостей.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 11-08-01268-а.) и ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 гг." (№ П230, № 14.740.11.0579, № 14.740.11.0103, № 16.740.11.0642 и 2012-1.2.2-12-000-2004-8441).

Список литературы

1. Mansur E., Mingxing Y., Yundong W., Youyuan D. A state-of-the-art review of mixing in microfluidic mixers // *Chinese J. Chemical Eng.* 2008. V. 16 (4). P. 503—516.
2. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Gavrilov A. A., Dekterev A. A. On Optimization of Mixing Process of Liquids in Microchannels // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics.* 2010. V. 3. N 2. P. 146—156.
3. Rudyak V. Ya., Minakov A. V., Gavrilov A. V. and Dekterev A. A. Simulation of flows in micromixers // *Thermophysics & Aeromechanics.* 2010. V. 17. P. 565—576.
4. Ахметбеков Е. К., Бильский А. В., Ложкин Ю. А., Маркович Д. М., Токарев М. П., Тюрюшкин А. Н. Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // *Вычислительные методы и программирование.* 2006. Т. 7. С. 79—85.
5. Токарев М. П., Маркович Д. М., Бильский А. В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // *Вычислительные технологии.* 2007. Т. 12. № 3. С. 109—131.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 537.87; 621.371, 544.576

С. С. Милкин, аспирант,
А. В. Стародубов, канд. физ.-мат. наук,
ст. науч. сотр.,
С. В. Герман, аспирант,
А. В. Маркин, инженер,
Д. А. Горин, д-р хим. наук, доц., проф.,
С. Б. Вениг, д-р физ.-мат. наук, проф., декан,
Ю. А. Калинин, д-р техн. наук, проф.,
руководитель ОФНС НИИ ЕН,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Саратовский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского",
e-mail: StarodubovAV@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИКИ ИЗМЕРЕНИЯ СВОЙСТВ КОЛЛОИДНЫХ И ЭМУЛЬСИОННЫХ СИСТЕМ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

Поступила в редакцию 18.07.2012

Рассмотрены особенности техники измерения свойств коллоидных и эмульсионных систем на сверхвысоких частотах. Разработаны конструкции коаксиальных измерительных ячеек. Проведена оптимизация их конструкции для исследований в диапазоне частот от 9 кГц до 3 ГГц. Представлены результаты измерения спектров коэффициентов отражения и передачи электромагнитных волн тестовых образцов нефти, керосина, коллоидного раствора оксида железа, обратной эмульсии (вода/керосин), дисперсионная среда которой содержала наночастицы оксида железа.

Ключевые слова: коллоидные и эмульсионные системы, взаимодействие электромагнитных волн с веществом, физический эксперимент

Одним из важных фундаментальных направлений научных исследований в настоящее время является изучение взаимодействия электромагнитных полей с нано- и микроструктурированными объектами, созданными как искусственным путем (например, различного рода коллоидные и эмульсионные системы), так и образованными в результате естественных процессов в природе (например, нефть, которая представляет собой сложно структурированный объект на микро- и наномасштабе с наличием естественных капсул—глобул с бронирующими оболочками, состоящими из асфальтенов [1]. Дан-

ные исследования способствуют более глубокому пониманию происходящих физических процессов в таких системах и уточнению теории взаимодействия электромагнитного излучения с веществами искусственного и естественного происхождения. Практическая значимость этого направления исследований заключается в разработке перспективных технологий по изменению физико-химических свойств различных веществ в целях получения материалов с заданными и дистанционно-управляемыми свойствами.

Одним из объектов, вызывающих интерес исследователей, являются наночастицы оксида железа. Наночастицы оксида железа могут иметь различный состав и тип кристаллической решетки, наиболее распространенными модификациями наночастиц оксида железа являются: гематит (α - Fe_2O_3), магемит (γ - Fe_2O_3) и магнетит (Fe_3O_4) [2]. Максимальные значения диэлектрических и магнитных потерь наблюдаются для композитов, содержащих наночастицы магнетита. Это определяет их высокую восприимчивость к поглощению микроволнового излучения [3]. Уникальные свойства магнетита определяют его возможные области практического применения. В частности, наночастицы магнетита, будучи встроенными в оболочку микрокапсул, могут быть использованы в системах адресной доставки биологически активных веществ с возможностью контролируемого дистанционного высвобождения посредством микроволнового излучения [4, 5]. Вместе с тем, добавление коллоидных растворов магнетита в водонефтяные эмульсии может усилить эффекты воздействия микроволнового излучения на нефть и водонефтяные эмульсии [6], что будет способствовать их лучшей очистке. Таким образом, изучение физических процессов взаимодействия микроволнового излучения с коллоидными и эмульсионными системами, в частности коллоидными растворами и эмульсиями наночастиц магнетита, будет способствовать поиску и открытию новых перспективных применений коллоидов наночастиц оксида железа в электронике, химической промышленности, биологии и медицине.

При измерении свойств коллоидных и эмульсионных сред необходимо учитывать, в особенности при математической обработке экспериментальных данных, что они могут обладать комплексными диэлектрической и магнитной проницаемостями. Кроме того, в некоторых работах пренебрегают частотной дисперсией параметров, характеризующих диэлектрические или магнитные свойства, что является не совсем корректным [7, 8]. Таким об-

разом, совершенствование метода измерения частотных зависимостей коэффициентов передачи и отражения электромагнитных волн сверхвысокой частоты при их взаимодействии с коллоидными и эмульсионными системами является важной задачей. Для ее решения необходимо создание измерительной ячейки оптимальной конструкции для жидких гетерогенных сред и программы математической интерпретации получаемых данных. С учетом перспектив использования для управления свойствами коллоидных растворов и эмульсий СВЧ нагрева для исследований выбран диапазон частот, характерный для промышленных установок обработки микроволновым излучением [6]. Цель настоящей работы — разработка инструментария и метода экспериментального измерения параметров взаимодействия СВЧ излучения с коллоидными и эмульсионными системами.

В настоящее время известно несколько методов измерения диэлектрических и магнитных параметров материалов на сверхвысоких частотах [9—12]. Не все эти методы подходят для исследования гетерогенных структур.

Для коллоидных и эмульсионных систем одним из корректных методов измерения свойств является волноводный метод. Для его использования в рассматриваемом диапазоне частот необходимо иметь коаксиальную ячейку, предназначенную для размещения в ней исследуемого вещества. Схема измерительной установки изображена на рис. 1. Измерительная ячейка представляла собой отрезок коаксиальной волноведущей линии, ограниченный с обоих концов пробками из фторопласта и заполняемый исследуемой жидкостью. В качестве контрольно-измерительного и исследовательского оборудования был использован цифровой двухпортовый анализатор СВЧ-цепей Agilent Technologies ENA-L RF Network Analyzer E5062A, подключаемый к измерительной ячейке с помощью гибких коаксиальных кабелей Agilent Technologies 11500D Cable Assembly (Type-N (m) to Type-N (m), DC to 18 GHz) и специализированных переходов с волновым сопротивлением 50 Ом. Измерительная ячейка представляется четырехполюсником, параметры матрицы рассеяния которого S_{11} , S_{21} , S_{22} , S_{12} подлежат измерению с помощью цифрового анализатора СВЧ цепей в ходе эксперимента. Предусматривалось, что система должна быть симметричной в плане эквивалентности соответствующих параметров матрицы рассеяния ($S_{11} = S_{22}$, $S_{12} = S_{21}$). При этом коэффициент поглощения

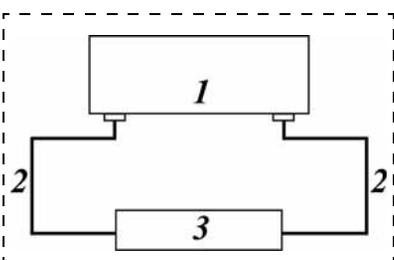


Рис. 1. Принципиальная схема установки:

1 — цифровой анализатор цепей; 2 — гибкий коаксиальный соединительный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом; 3 — коаксиальная измерительная ячейка, заполненная исследуемым веществом

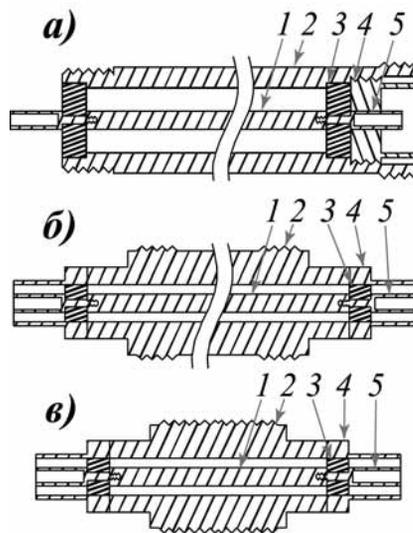


Рис. 2. Конструкции коаксиальных измерительных ячеек со следующими отношениями внутренних диаметров проводников:

а — 16/7 мм, длиной 200 мм; б — 10/4,3 мм, длиной 40 мм; в — 10/4,3 мм, длиной 20 мм. Цифрами на рисунке обозначены: 1 — внутренний проводник; 2 — внешний проводник; 3 — пробка из фторопласта; 4 — фиксирующий зажим; 5 — конектор разъема

структуры по мощности A можно вычислить по следующей формуле [13]:

$$A = 1 - R \cdot R^* - T \cdot T^*,$$

где R и T — амплитудные коэффициенты отражения и передачи структуры соответственно, знак * означает комплексное сопряжение.

В качестве одного из вариантов измерительной ячейки был использован отрезок коаксиальной линии передачи с отношением внутренних диаметров проводников 16/7 мм, длиной 200 мм, ограниченный с обоих концов слабопоглощающими пробками из фторопласта (рис. 2, а). В диапазоне частот 600...3 МГц частотные зависимости коэффициента отражения и коэффициента передачи электромагнитной волны в ячейке без заполнения представлены на рис. 3, а, б (кривые 1). Полученные результаты свидетельствуют о том, что в измерительном тракте отсутствуют паразитные эффекты, вызванные несогласованностью элементов тракта или их неработоспособностью, которые могут негативно повлиять на результаты измерений.

Измерение параметров матрицы рассеяния, проведенные для ячейки, заполненной керосином, показали, что в рассматриваемом диапазоне частот наблюдаются периодические изменения коэффициента отражения (рис. 3, в кривые 1). Данный факт свидетельствует о том, что отрезок волноведущей линии ячейки играет роль полуволнового коаксиального резонатора [14]. При этом часть энергии электромагнитной волны вследствие многократных переотражений поглощается средой заполнения линии, что искажает реальную картину частотной зависимости параметров матрицы рассеяния. Это делает проблематичным использование ячейки таких раз-

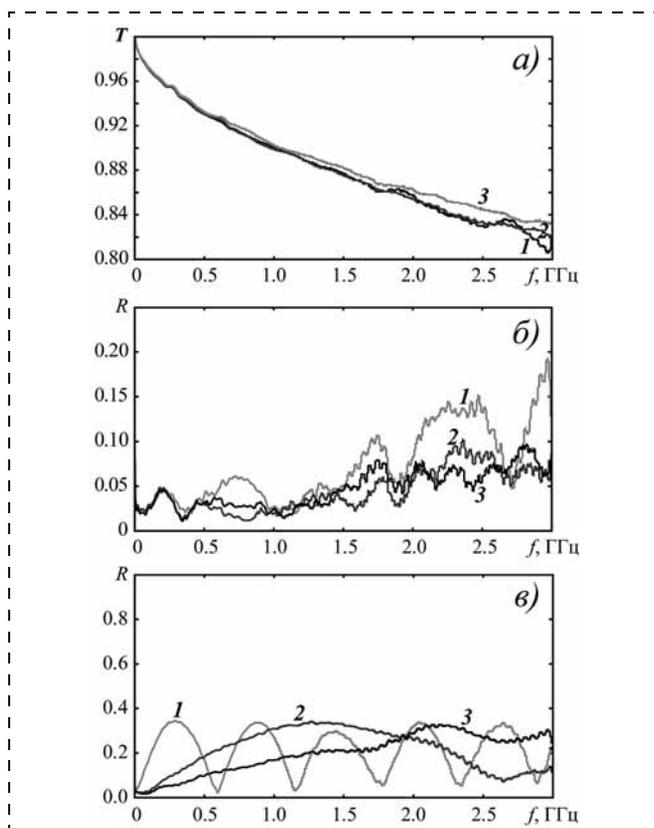


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициентов отражения R (б), передачи T (а) пустых ячеек и частотная зависимость коэффициентов отражения R с керосиновым заполнением (в) для трех конструкций коаксиальных измерительных ячеек:

1 — ячейка с отношением внутренних диаметров проводников 16/7 мм, длиной 200 мм, 2 — ячейка с отношением внутренних диаметров проводников 10/4,3 мм, длиной 40 мм, 3 — ячейка с отношением внутренних диаметров проводников 10/4,3 мм, длиной 20 мм

меров для проведения количественного анализа свойств заполняющей жидкости, а также может послужить причиной некорректной интерпретации результатов эксперимента при качественном анализе.

Для исключения резонансных явлений при создании измерительной ячейки был использован отрезок коаксиальной линии с отношением внутренних диаметров проводников 10/4,3 мм, длиной 40 мм (см. рис. 2, б). Конструкция перехода позволяет помещать исследуемый образец жидкости, надежно изолируя его от остального измерительного тракта. Частотная зависимость коэффициента отражения и коэффициента передачи ячейки без заполнения представлены на рис. 3, а, б (кривые 2). Полученные экспериментальные результаты показывают, что отрезок коаксиальной волноведущей линии согласован и не вносит ощутимого искажения. Следует также отметить, что изменение продольных размеров коаксиала приводит к уменьшению коэффициента отражения в области частот более 1,5 ГГц. Лучшее согласование ячейки с трактом обусловлено более простой конструкцией ячейки. Измерение параметров матрицы рассеяния, проведенное для ячейки, заполненной керосином, показало, что в рассматриваемом диапазоне частот наблюда-

ется локальный максимум зависимости коэффициента отражения, наличие которого объясняется проявлением резонансных свойств ячейки (рис. 3, в, кривые 2). Уменьшение длины ячейки снизило, но не исключило полностью проявление резонансных явлений в исследуемом диапазоне частот. Таким образом, данную ячейку для проведения измерений использовать также нецелесообразно, поскольку резонансные свойства ячейки в диапазоне частот до 3 ГГц будут искажать результаты измерений.

В работе [15] при изучении диэлектрических свойств нефтесодержащих пород показано, что при измерениях на частотах от 1 ГГц и выше или при высоких значениях мнимой и действительной частей коэффициента диэлектрической проницаемости для исключения резонансных явлений необходимо использовать коаксиальные измерительные ячейки длиной не более 20 мм. Одним из возможных вариантов уменьшения длины заполненного участка коаксиальной линии является введение дополнительных пробок из слабопоглощающего материала внутрь объема ячейки. Проведенные экспериментальные исследования показали, что при наличии дополнительных пробок из слабопоглощающего материала во внутреннем объеме ячейки наблюдается значительное увеличение коэффициента отражения электромагнитных волн. Данный эффект может внести сильные искажения в результат измерений свойств исследуемых образцов, что не позволяет использовать такое решение для создания измерительной ячейки. В связи с этим была разработана конструкция коаксиальной ячейки необходимой геометрии с отношением внутренних диаметров проводников 10/4,3 мм и длиной 20 мм (см. рис. 2, в), и изготовлен опытный образец коаксиальной измерительной ячейки, внешний вид которой представлен на рис. 4.

Преимуществами разработанной конструкции ячейки являются простота при изготовлении, возможность варьирования длины ячейки при наличии набора внутренних и внешних проводников разной длины, удобство разборки и сборки ячейки, легкость заполнения жидкостью и ее удаления, хорошая изоляция жидкости от остального тракта. Частотные зависимости коэффициентов передачи и отражения пустой ячейки изображены на рис. 3, а, б (кривые 3). Из результатов измерения следует, что данная ячейка имеет наименьший коэффициент отражения и наибольший коэффициент передачи практически во всем исследуемом диапазоне частот по сравнению с другими исследованными вариантами коаксиальных

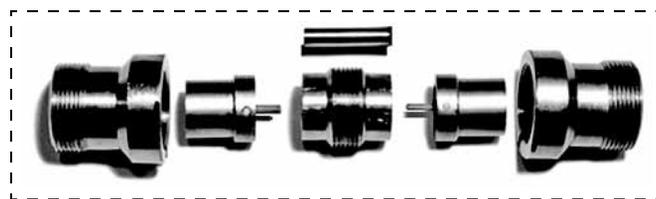
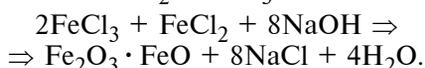


Рис. 4. Фотография разработанной коаксиальной измерительной ячейки с отношением внутренних диаметров проводников 10/4,3 мм, длиной 20 мм

измерительных ячеек. При измерении частотных зависимостей коэффициентов отражения и передачи электромагнитных волн, проходящих через заполненную керосином ячейку, резонансных эффектов не наблюдалось (см. рис. 3, в, кривые 3). Это позволило сделать вывод о приемлемости использования разработанной измерительной ячейки для проведения качественных и количественных экспериментов по изучению поглощения энергии микроволнового излучения различными коллоидными и эмульсионными системами.

Разработанная измерительная ячейка была использована для проведения измерения характеристик прохождения и отражения СВЧ волны при заполнении ее различными тестовыми образцами. Поскольку одним из объектов экспериментального исследования выступали коллоидные и эмульсионные системы с наличием наночастиц магнетита (Fe_3O_4), диспергированных в керосине и стабилизированных олеиновой кислотой, следует остановиться на методе получения магнитных наночастиц. Наночастицы оксида железа получали методом, представляющим собой модификацию метода, ранее предложенного Рене Массартом [16]. Суть метода заключается в следующем. К 0,1 М-раствору NaOH приливали смесь солей FeCl_2 и FeCl_3 :



Полученный раствор перемешивали в течение 30 мин. Затем осуществлялась промывка 100 мл H_2O .

Для получения магнитной жидкости на основе керосина наночастицы переводили в неполярный растворитель и стабилизировали олеиновой кислотой. Для этого сразу после промывки смешивали полученный водный коллоид и керосин в соотношении 1:1,5 (по объему) соответственно и добавляли олеиновую кислоту. В результате перемешивания с использованием ультразвука в течение 30 мин частицы оксида железа переводили в керосин (ГОСТ 11128—65) и были стабилизированы олеиновой кислотой. Полученную смесь разделяли с помощью центрифугирования.

Используя лазерный спектрометр комбинационного рассеяния света зондовой нанолaborатории Интегра Спектра ($\lambda_{\text{laser}} = 632,8$ нм, мощность 1 мВт, время накопления сигнала 60 с), установили, что химический состав наночастиц коллоида соответствует магнетиту. Данное заключение сделано на основании наличия в спектре коллоида (рис. 5) наночастиц оксида железа интенсивного пика при 670 см^{-1} , который соответствует магнетиту [17, 18]. Наличие стабилизатора доказывает присутствие пиков при 1070 и 1650 см^{-1} , относящихся к колебаниям карбоксильной группы олеиновой кислоты [19].

Используя коллоидный раствор магнетита, диспергированного в керосине, был приготовлен об-

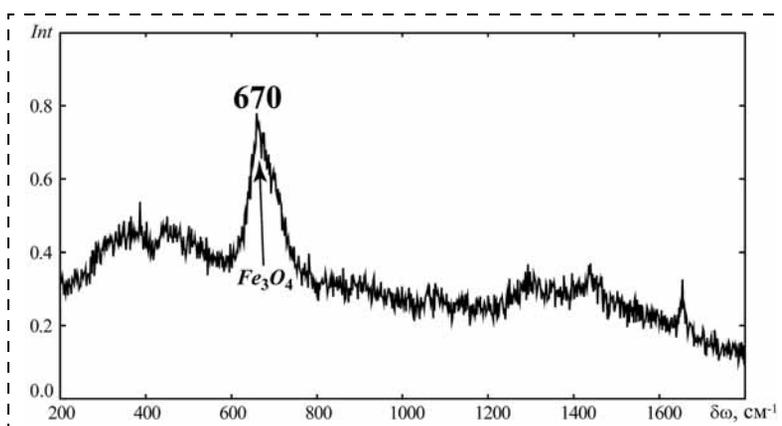


Рис. 5. Спектр комбинационного рассеяния света коллоидного раствора наночастиц магнетита

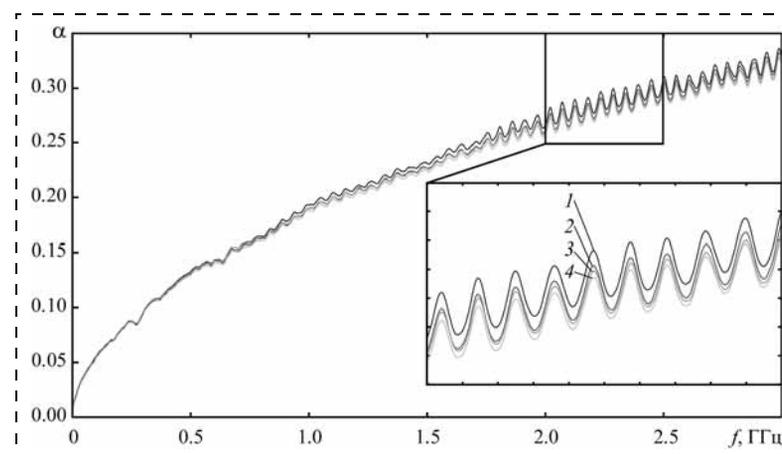


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента поглощения по мощности для различных образцов:

1 — коллоидный раствор наночастиц магнетита; 2 — обратная эмульсия наночастиц магнетита; 3 — нефть; 4 — керосин

разец обратной эмульсии (вода/керосин). Смесь растворов для приготовления эмульсии содержала 10 % (по объему) дистиллированной воды с добавлением полистиролсульфоната натрия в качестве стабилизатора (концентрация в воде 2 мг/мл). Эмульсию получали обработкой смеси зондовым ультразвуком в течение 30 с.

Было проведено исследование характеристик СВЧ волны при заполнении ячейки коллоидными растворами и эмульсиями различных составов: керосин осветительный (ГОСТ 11128—65), прошедшая предварительную очистку нефть (месторождение в Санкт-Петербургской области), коллоидный раствор наночастиц магнетита, диспергированных в керосине осветительном, эмульсия, содержащая наночастицы магнетита и микрокапли воды, с керосином в качестве основы. На рис. 6 представлены графики частотной зависимости коэффициента α поглощенной в образце мощности микроволнового излучения.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что использование разработанной коаксиальной ячейки позволяет проводить измерения коллоидных и эмульсионных систем с близкими значениями диэлектрической проницаемости. Измерения показали, что разрешающая спо-

способность измерительной установки позволяет выявить наличие наночастиц магнетита в растворе. Для увеличения чувствительности к изменениям свойств исследуемых жидкостей следует улучшить согласование измерительной ячейки с трактом и, возможно, использовать для пробок, изолирующих тракт от жидкости, материал с меньшей диэлектрической проницаемостью и потерями на СВЧ.

Таким образом, показана возможность использования разработанной конструкции коаксиальной измерительной ячейки для проведения исследований свойств коллоидных и эмульсионных систем в диапазоне частот до 3 ГГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ 09-03-00245-а.

Список литературы

1. Саяхов Ф. Л., Хакимов В. С., Арутюнов А. И. и др. Диэлектрические свойства и агрегативная устойчивость водонефтяных эмульсий // Нефтяное хозяйство. 1979. № 1. С. 36–39.
2. Jubb A. M., Allen H. C. Vibrational Spectroscopic Characterization of Hematite, Maghemite, and Magnetite Thin Films Produced by Vapor Deposition // Appl. Mater. & Interf. 2010. V. 10. P. 2804–2812.
3. Kingman S. W., Rowson N. A. Microwave treatment of minerals — a review // Minerals Engineering. 1998. V. 11, N. 11. P. 1081–1087.
4. Buske V. N., Sukhorukov G. B., Antipov A. A., Leporatti S., Lichtenfeld H., Baumler H., Donath E., Moehwald H. Novel polyelectrolyte multilayer micro- and nanocapsules as magnetic carriers // J. Magnetism Magnetic Mater. 2001. V. 225, N 1–2. P. 59–66.
5. Hu S.-H., Tsai C.-H., Liao C.-F., Liu D.-M., Chen S.-Y. Controlled Rupture of Magnetic Polyelectrolyte Microcapsules for Drug Delivery // Langmuir. 2008. V. 24. P. 11811–11818.
6. Калинин Ю. А., Стародубов А. В., Березин С. В. О взаимодействии микроволнового излучения с микро- и наноструктурами водонефтяных эмульсий // Наука и технологии в промышленности. 2009. № 3. С. 28–31.

7. Fannin P. C., Marin C. N., Malaescu I., Stefu N. Microwave dielectric properties of magnetite colloidal particles in magnetic fluids // Journal of Physics: Condensed Matter. 2007. V. 19, N 3. P. 036104.

8. Kirschvink J. L. A Possible Mechanism for Coupling Nonthermal Levels of Radiation to Biological Systems // Division of Geological and Planetary Sciences, The California Institute of Technology. 1996. V. 17 (3). P. 187–194.

9. Шестопалов В. Д., Яцук П. Методы измерения диэлектрических проницаемостей вещества на сверхвысоких частотах // Успехи физических наук. 1961. Т. 74. № 4. С. 721–755.

10. Беляев Б. А., Лексиков А. А., Тюрнев В. В. Микрополосковый метод исследования диэлектрической проницаемости материалов на сверхвысоких частотах // Приборы и техника эксперимента. 1995. № 6. С. 123.

11. Демьянов А. А., Семенов М. Г., Тамарин В. А. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости сильнопоглощающих жидкостей // Приборы и техника эксперимента. 1974. № 3. С. 132–133.

12. Дьяконова О. А., Казанцев Ю. Н., Маречек С. В. Измерения коэффициента генерации гармоник радиопоглощающим материалом в СВЧ-диапазоне // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 2. С. 58–65.

13. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Акустический ин-т АН СССР, 1973. 343 с.

14. Козарь А. В., Колесников В. С., Пирогов Ю. А. Резонансное поглощение волновой энергии в слоистых средах // Материалы Всесоюзного симпозиума "Приборы, техника и распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере". 1976. С. 131.

15. Эпов М. И., Миронов В. Л., Бобров П. П., Савин И. В., Репин А. В. Исследование диэлектрической проницаемости нефтесодержащих пород в диапазоне частот 0,05–16 ГГц // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 5. С. 613–618.

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

17. Slavov L., Abrashev M. V., Merodiiska T., Gelev Ch., Vandenberghe R. E., Markova-Deneva I., Nedkov I. Raman spectroscopy investigation of magnetite nanoparticles in ferrofluids // J. Magn. Mater. 2010. V. 322. P. 1904–1912.

18. Shebanova O. N., Lazor P. Raman study of magnetite (Fe₃O₄): laser-induced thermal effects and oxidation // J. Raman Spectroscopy. 2003. V. 34. P. 845–852.

19. Zhang L., He R., Gu H.-Ch. Oleic acid coating on the monodisperse magnetite nanoparticles // Applied Surface Science. 2006. V. 253, Is. 5. P. 2611–2617.

УДК 621.382

Д. В. Латохин, мл. науч. сотр.,
Учреждение Российской академии наук институт нанотехнологий микроэлектроники РАН,
г. Москва, e-mail: dimonstrik@list.ru,
Э. Н. Воронков, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОПЛАЗМЕННОГО ПРОБОЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

Поступила в редакцию 16.08.2012

Сообщается о численном моделировании микроплазм в неупорядоченных полупроводниковых структурах при условиях, аналогичных условиям возникновения микро-

плазменного пробоя в пленках As₂Se₃ — одного из широкозонных халькогенидных стеклообразных полупроводников. Предложена модель, позволяющая описать процесс микроплазменного пробоя в аморфных пленках.

Ключевые слова: полупроводники, микроплазма, электропроводность, пробой

Введение

Электрический пробой в тонких пленках стеклообразных полупроводников достаточно интенсивно исследуется в последнее время и возникает при полях, превосходящих некоторое пороговое $E_{th} = (3...6) \cdot 10^5$ В/см. В широкозонных полупроводниках, таких как As₂Se₃, пробой может сопровождаться возникновением плазменного канала, в котором материал плавится или выгорает [1, 2]. В работе [3] было обнаружено, что в свеженанесенных пленках As₂Se₃ при полях, значительно меньших E_{th} , могут возникать токовые неустойчивости, по своим свойствам напоминающие микроплазменный

пробой в обратно смещенных кремниевых электронно-дырочных переходах. Принято считать, что микроплазмы, как правило, располагаются в местах скопления различного рода структурных дефектов, образуясь благодаря малым неоднородностям в области пространственного заряда p – n -перехода, где создается сильное электрическое поле. Из сравнения характеристик микроплазменного пробоя в кремнии и в As_2Se_3 напрашивается вывод, что природа микроплазменного пробоя в них аналогична [3–5].

Цель данной работы — обосновать возможность микроплазменного пробоя в стеклообразных полупроводниках. Для составления исходной модели можно воспользоваться моделью, которая была развита для анализа неравновесных динамических процессов [4, 5], были приняты во внимание также результаты работы [6] по созданию некоторой обобщенной модели "активатор—ингибитор".

Математическая модель микроплазменного пробоя

Математический подход, используемый для составления модели микроплазменного пробоя, основан на том, что неравновесные явления в нелинейных системах вне зависимости от природы физических процессов, лежащих в их основе, могут быть сведены к некоторым общим уравнениям, описывающим формирование пространственных неоднородностей, развивающихся под действием внешних сил и диффузионных процессов. На основе концепций, изложенных в работе [6], необходимо было создать трехкомпонентную модель типа реакция—диффузия, подобно моделям для движущихся "частиц". В отличие от стандартной двухкомпонентной модели трехкомпонентные модели способны описывать локализованные движущиеся структуры не только в одномерных системах, но и в многомерном случае. Переход от стационарной к движущейся структуре происходит при увеличении времени релаксации первого ингибитора таким же образом, как и для обычной двухкомпонентной модели распространения импульса в возбудимой среде.

Предположим, что состояние полупроводникового прибора может быть охарактеризовано единственной переменной $a(x, y, t)$, которая зависит от поперечных координат (x, y) и времени t , но не зависит от продольной координаты z (рис. 1). Физический

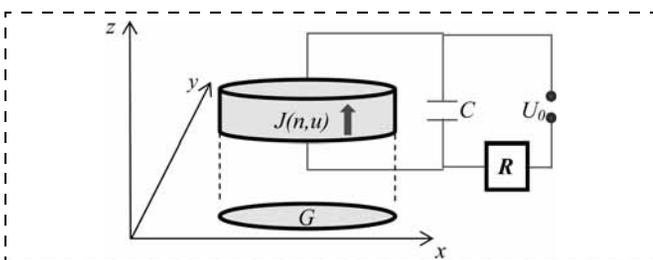


Рис. 1. Полупроводниковый прибор большой площади и внешняя цепь. Область G , на которой определена функция $n(x, y, t)$, представляет собой проекцию прибора на плоскость Oxy , $J(n, u)$ плотность тока

смысл переменной a зависит от конкретной системы, и в нашем случае в роли активатора a выступает средняя концентрация электронов $a = n(x, y, t)$, накопленных на ловушках — дефектах неупорядоченного полупроводника.

Динамика переменной внутреннего состояния прибора определяется нелинейным параболическим уравнением

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla_{\perp}(D(n)\nabla_{\perp}n) + f(n, u), \quad \nabla_{\perp} \equiv (\partial_x, \partial_y), \quad (1)$$

где u — напряжение на приборе; $D(n)$ характеризует поперечную "объемную" связь между элементами структуры в плоскости (x, y) ; $f(n, u)$ задает вид нелинейности системы и, по сути, представляет собой функцию локальной кинетики. Вторым уравнением системы должно быть уравнение Кирхгофа, которое описывает динамику напряжения u :

$$\tau_u \frac{\partial u}{\partial t} = L^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - B - u + U_0, \quad (2)$$

где τ_u — время релаксации; L^2 — характерная толщина растекания тока; $B = j_0 U_0^{-1} \rho$; $\rho = L^2 / \sigma$; j_0 и σ — полный ток и проводимость соответственно; U_0 — полное падение напряжения.

Далее необходимо учесть влияние температуры на процессы регенерации. В случае, когда разогрев системы влияет на пространственно-временную динамику токораспределения (справедливо для рассматриваемой системы), необходимо установить зависимость функции $f(n, u) \rightarrow f(n, u, T)$ локальной кинетики от температуры и получить пространственно-временную динамику температуры T . Поскольку длину тепловой диффузии для тонких пленок можно считать превышающей толщину структуры w , динамику температуры можно также задать двумерным уравнением:

$$c\rho w \frac{\partial T}{\partial t} = kw\Delta_{\perp}T + ju - \gamma(T - T_{ext}), \quad \Delta_{\perp} = \partial_x^2 + \partial_y^2, \quad (3)$$

где T отвечает средней температуре прибора вдоль вертикального направления оси z ; параметрами уравнения выступают удельная теплоемкость c , плотность ρ и теплопроводность k материала; $j = env_n$ — плотность тока; v_n — скорость пролета носителя заряда через область пространственного заряда (ОПЗ). В правой части уравнения второе слагаемое отвечает за Джоулев нагрев, третье слагаемое отвечает за внешнее охлаждение системы (T_{ext} имеет смысл эффективной температуры внешнего теплового резервуара, в нашем случае может соответствовать комнатной температуре). Эффективный коэффициент теплопередачи γ , нормированный на единицу площади структуры, характеризует внешнее охлаждение. Для характерных масштабных величин системы (тепловая релаксация τ_T ,

длина тепловой диффузии l_T и тепловая скорость v_T) справедливы следующие выражения:

$$\tau_T = \frac{c\rho w}{\gamma}; l_T = \sqrt{\frac{kw}{\gamma}}; v_T = \frac{l_T}{\tau_T}. \quad (4)$$

Таким образом, предварительно сформированная математическая модель для описания процессов микроплазменного пробоя в неупорядоченных полупроводниках имеет вид трехкомпонентной модели реакция—диффузия:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla_{\perp}(D(n)\nabla_{\perp}n) + f(n, u, T); \quad (5)$$

$$\tau_u \frac{\partial u}{\partial t} = L^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - B - u + U_0; \quad (6)$$

$$\tau_T \frac{\partial T}{\partial t} = l_T^2 \Delta_{\perp} T + (Ju/\gamma + T_{ext} - T). \quad (7)$$

Уравнение баланса электронов (для рассматриваемого участка халькогенидного стеклообразного полупроводника справедлив закон сохранения заряда) уточняет вид уравнения (5) следующим образом:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D\nabla_{\perp}n + nv_i(n, u, T) - \frac{n}{\tau_n} + G_T. \quad (8)$$

Первое слагаемое в правой части (8) связано с диффузионным растеканием тока, оно не зависит от времени и после интегрирования по объему даст поток, вытекающий через охватывающую активную область. Второе слагаемое отвечает за процесс ионизации и означает скорость ионизации носителей в рассматриваемой области. Третье слагаемое представляет собой время жизни носителя, т. е. $\tau_n = w/v_n$ означает время пролета через ОПЗ. Последнее слагаемое G_T представляет собой скорость тепловой генерации носителей в ОПЗ (более строго необходимо учитывать и туннельные эффекты при генерации носителей заряда).

Таким образом, при наличии у прибора полосковой геометрии, согласно предложенной модели, окончательный вид системы уравнений, описывающей микроплазменный пробой в неупорядоченных полупроводниковых структурах, имеет следующий вид:

$$\tau_n \frac{\partial j}{\partial t} = l_n^2 \frac{\partial^2 j}{\partial x^2} + v_i(u, T)v_i(j)jk_1 - j + k_2j_i; \quad (9)$$

$$\tau_u \frac{\partial u}{\partial t} = L^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - B - u + U_0; \quad (10)$$

$$\tau_T \frac{\partial T}{\partial t} = l_T^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - (T - 1) + C_p u j, \quad (11)$$

где $l_n^2 = D\tau_n$; $v_i(u, T)v_i(j)$ — скорость ионизации; k_1, k_2 — функции для моделирования локальных неоднородно-

стей; j_i — характерное значение тока при насыщенной скорости носителей заряда; $C_p = R_i U_0 j_0 / T_{ext}$; R_i — удельное тепловое сопротивление.

Результаты численного моделирования пробоя

Система уравнений (9)—(11) решалась численно, применением метода простых итераций и прогонки согласно подходам к решению диффузионных уравнений, описанных, например, в [2]. Рассматриваемая система одномерных параболических квазилинейных уравнений аналогична системе уравнений, описывающих процессы теплопроводности с источником.

Для численного решения данной системы необходимо составить разностную схему, используя "шеститочечный" [2] шаблон, а слагаемые для источника аппроксимировать средним значением между соседними пространственными узлами сетки. После составления разностной схемы получаем систему нелинейных (относительно неизвестных функций) алгебраических уравнений. С использованием метода простых итераций (последовательных приближений) система линеаризуется, и неизвестные значения искомых функций в узлах находятся методом прогонки. Небыстрая сходимость итерационного метода вынуждает ввести критерий сходимости и осуществлять его контроль в процессе решения.

Представленная на рис. 2 зависимость отображает особенности протекания процесса возбуждения микроплазменного пробоя: наглядно представлена временная задержка перед первым импульсом (порядка τ_T), а также видны моменты выключения микроплазм за счет воздействия "ингибиторов". Таким образом, примененная модель позволяет оценивать пробойные характеристики полупроводниковых структур, связывая безразмерные числовые коэффициенты с реальными физическими характеристиками объектов.

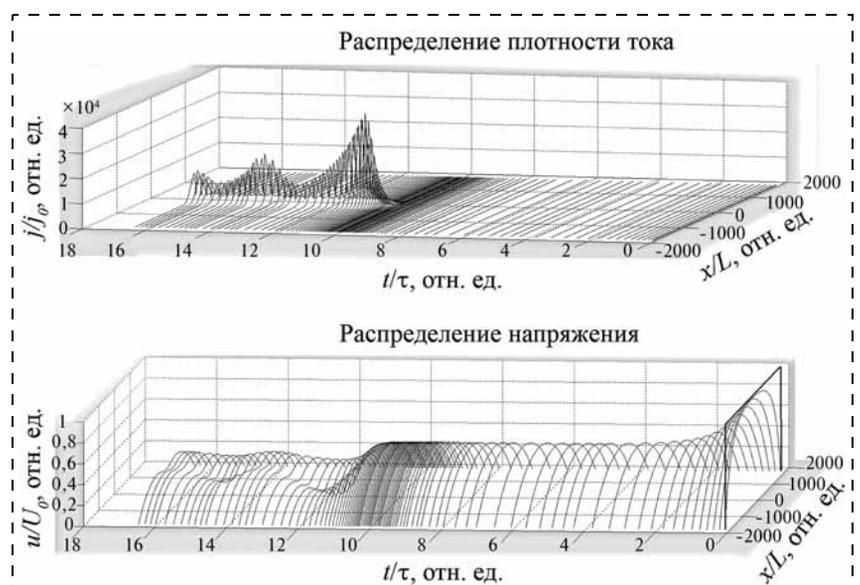


Рис. 2. Графики зависимости распределения плотности тока и напряжения в одномерной полупроводниковой структуре от времени

В данной работе при анализе результатов численного моделирования обсуждалась согласованность результатов с реальными эффектами при наблюдении пробоя в полупроводниковых структурах при условиях, аналогичных приведенным в работе [3].

Заключение

Предложена математическая модель, используемая для описания процессов микроплазменного пробоя, а также приведены результаты численного моделирования процессов микроплазменного пробоя в полупроводниковых структурах. Показаны особенности кинетики микроплазменных импульсов, их форма, и приведены оценки их длительности в зависимости от условий возбуждения. Кратко обсуждается согласованность числовых данных предложенной модели с реальными экспериментальными данными по пробоям в полупроводниковых структурах и неупорядоченных полупроводниковых средах.

Показано, что при условиях, аналогичных приведенным в работе [3], возникают неустойчивости тока, которые можно интерпретировать как микроплазменный пробой, приводящий к резкому возрастанию тока. Модель отражает температурную зависимость протекающего процесса пробоя: при понижении температуры связанный с микроплазменным пробоем избыточный ток исчезает, при повышении температуры он возникает вновь.

Список литературы

1. Fairushin R., Optoelectron J. Amorphous arsenic chalcogenide films. Adv. Mater. 2001. Vol. 3 (2). P. 499.
2. Voronkov E. N. Pulsed breakdown of chalcogenide glassy semiconductor films. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 2002. Vol. 4, № 3. P. 793–798.
3. Voronkov E. N., Eganova E. M. Low-field microplasma breakdown. Applied Physics Letters. 2011. Vol. 99. P. 112105.
4. Грехов И. В., Сережкин Ю. Н. Лавинный пробой $p-n$ -перехода. Л.: Энергия, 1980.
5. Плохотников К. Э. Вычислительные методы. М.: Горячая Линия — Телеком, 2009.
6. Кернер Б. С., Осипов В. В. Самоорганизация в активных распределенных средах // УФН. 1990.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

УДК 621.315

- В. В. Амеличев**¹, канд. техн. наук, нач. отд.,
В. В. Аравин², руководитель,
А. Н. Белов³, канд. техн. наук, доц.,
А. Ю. Красюков³, канд. техн. наук, доц.,
А. А. Резнев⁴, д-р техн. наук, зам. руководителя,
А. Н. Сауров¹, д-р техн. наук, чл.-корр., директор
¹ НПК "Технологический центр",
e-mail: avv@tcen.ru
² ФГКУ "Войсковая часть 35533",
e-mail: viladge@dol.m
³ Национальный исследовательский университет
"МИЭТ", e-mail: belov@dtd.miee.ru
⁴ ФГКУ "Войсковая часть 68240", e-mail:
viladge@dol.ru

СОЗДАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ УСИЛЕНИЯ МАГНИТНОГО СИГНАЛА В БЕСПРОВОДНОЙ МЭМС НА ОСНОВЕ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Поступила в редакцию 13.07.2012

Представлены результаты создания интегральных компонентов усиления магнитного сигнала на основе пленок

пермаллоя. Рассмотрены способы повышения чувствительности магниторезистивных преобразователей и построения на их основе беспроводных МЭМС с магнитной связью для передачи информации на малые расстояния. Приведены результаты моделирования распределения магнитного поля в полосках пермаллоя. Представлены результаты формирования концентраторов магнитного поля толщиной 10...11 мкм с помощью электрохимического осаждения.

Ключевые слова: беспроводная МЭМС, интегральная микроструктура, компонент усиления, концентратор, магнитное поле, магнитная связь, пермаллой, тонкая пленка, принцип построения, электронная компонентная база, электрохимическое осаждение

Введение

Развитие рынка мобильных устройств происходит в настоящее время достаточно динамично с использованием технологий беспроводного соединения. Для ряда специфических применений рассматриваются различные способы беспроводной передачи информации, основанные на всевозможных физических эффектах. Не менее важны при этом оказываются вопросы безопасности информации и здоровья человека. Здесь магнитная связь имеет некоторые преимущества перед другими видами беспроводной связи (радиочастотной и оптической), поскольку хорошо проникает через объекты, создающие помехи, не боится загрязнений и не оказывает негативного влияния на здоровье [1]. Технология магнитной связи обеспечивает безопасную закрытую зону, которая окружает источник передачи информации, как правило, небольшим радиусом действия (до 2,5 м) с выраженной направленностью излучения и приема [2]. Однако недавно в США

(Lockheed Martin's MagneLink Magnetic Communication System) магнитную связь стали применять на шахтах, как единственно возможную беспроводную, для передачи информации сквозь толщину земляной породы на расстояния до 500 м [3].

Для приема магнитного сигнала необходимы высокочувствительные преобразователи магнитного поля, которые могут быть реализованы, например, в виде миниатюрных катушек с ферритовыми сердечниками [1, 2]. Однако такое конструктивное исполнение не имеет перспективы в миниатюризации и интеграции с другими функциональными микроэлементами и микросистемами на их основе. Альтернативным решением в данном случае может быть создание высокочувствительных преобразователей слабого магнитного поля на основе тонкопленочных магниторезистивных структур по интегральной технологии, с перспективой объединения их с электронными схемами на одном кристалле по совмещенной технологии. Но прежде необходимо добиться высоких показателей по преобразованию слабого магнитного сигнала.

Одним из эффективных методов повышения чувствительности магниторезистивных преобразователей является интеграция их с концентраторами магнитного поля [4, 5]. Из возможных ферромагнитных материалов наиболее подходящим для формирования концентраторов магнитного поля является пермаллой Ni(81 %)—Fe(19 %), обладающий хорошими магнитными и механическими свойствами. Пленки пермаллоя могут иметь толщину на кремниевой пластине до нескольких десятков микрон и легко осаждаются как магнетронным способом, так и гальваническим [6]. Магнетронным способом изготавливаются, как правило, пленки толщиной не более 2000 нм, более толстые пленки формируются гальваническим осаждением. Преимущество магнетронного способа — в более простой технологии формирования концентраторов и более высокой равномерности толщин пленок в структуре по пластине.

Моделирование распределения магнитного поля в полосках пермаллоя

Компьютерное моделирование позволяет визуально воспринять происходящие в структуре процессы и провести оптимизацию параметров после настройки созданной модели. Рассмотрим вариант концентраторов магнитного поля, который может быть реализован с помощью магнетронного способа формирования полосок из пермаллоя толщиной до 1,5 мкм с коэффициентом усиления магнитного поля не менее 10.

Для концентраторов магнитного поля могут применяться протяженные прямоугольные фигуры из пермаллоя, расположенные на небольшом расстоянии друг от друга. На усилительные характеристики таких элементов влияет как форма, так и зазор между ними. Для оценки усилительных свойств концентраторов необходимо учитывать распределение магнитного поля в трехмерной его структуре. Теоретически для решения такой задачи необходимо воспользоваться известными выражениями.

$$\operatorname{div} B = 0, \quad B = \mu_0 \mu H, \quad (1)$$

где B — вектор магнитной индукции; μ_0 — магнитная постоянная ($1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м); μ — магнитная проницаемость материала; H — вектор напряженности магнитного поля.

В отсутствие электрического тока напряженность магнитного поля может быть выражена через обобщенный скалярный потенциал φ в соответствии со следующим уравнением:

$$H = -\operatorname{grad}(\varphi). \quad (2)$$

Таким образом, в общем случае для расчета распределения магнитного поля в трехмерной структуре с учетом зависимости $\mu(H)$ необходимо решить уравнение для скалярного потенциала:

$$\operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}(\varphi)) = 0. \quad (3)$$

Для проведения расчета уравнение (3) было дополнено граничными условиями по φ , магнитными параметрами материалов и определенными геометрическими размерами конструкции.

Расчеты распределения магнитного поля в структурах с одним и двумя концентраторами были проведены с использованием программы SOLIDIS3D. Эскиз рассчитываемых структур концентраторов показан на рис. 1.

Параметры рассчитываемых структур концентраторов варьировались в следующих пределах:

- длина концентратора $a = 5,0$ мм;
- ширина концентратора $b = 1$ мм;
- зазор между концентраторами $L = 5 \dots 50$ мкм;
- толщина концентратора $d = 0,15 \dots 1,5$ мкм.

Кроме того, расчетная модель рассматриваемой структуры с одним и двумя концентраторами включает в себя:

- геометрию концентраторов и окружающей среды;
- характеристики материалов концентраторов и окружающей среды.

Геометрия рассматриваемой структуры концентратора была сформирована в интерактивном режиме с использованием программы TED. В качестве окружающей среды для модели полоски из пермаллоя был выбран воздух с температурой 22 °С. Внешнее магнитное поле величиной 0,1...1,0 мТл в созданной модели задавалось с направлением вдоль длинной стороны полоски. На рис. 2 (см. вторую сторону обложки) представлена модель половины полоски из пермаллоя (граница раздела — ось симметрии, проходящая вдоль полоски, находится посередине), а на рис. 3 (см. вторую сторону обложки) показано распределение магнитного поля в боковом сечении структуры с зазором $L = 5$ мкм между двумя полосками концентраторов толщиной $d = 1,5$ мкм.

В результате проведенных расчетов при одинаковом соотношении геометрических параметров полосок пермаллоя ($a/b = 5$, где a и b — длина и ширина по-

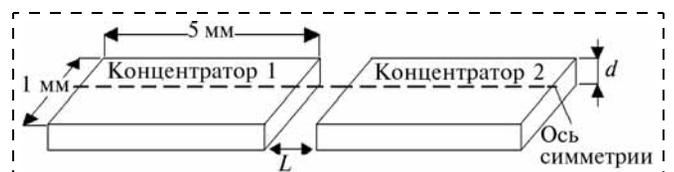


Рис. 1. Структура с двумя сплошными одинаковыми концентраторами

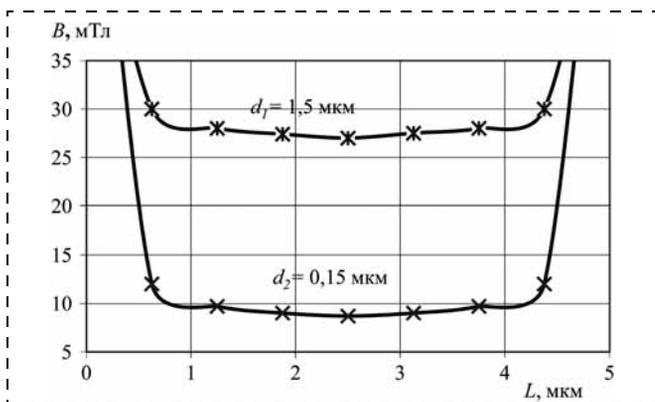


Рис. 4. Распределение магнитного поля в горизонтальном сечении структуры с двумя концентраторами (зазор между концентраторами $L = 5$ мкм) при разной толщине концентратора ($d_1 = 1,5$ мкм и $d_2 = 0,15$ мкм) в условиях внешнего поля 1 мТл

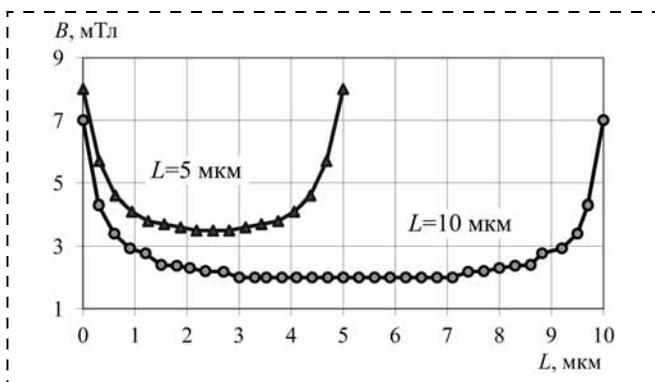


Рис. 5. Распределение магнитного поля в горизонтальном сечении (в зазоре между концентраторами $L = 5$ и 10 мкм) для структур с толщиной 1,2 мкм и при внешнем магнитном поле 0,1 мТл

лосок), фиксированном зазоре между полосками ($L = 5$ мкм) и при вариации толщины полосок ($d = 0,15$ мкм и $1,5$ мкм) было установлено, что в центральной части зазора усиление внешнего поля концентраторами с толщиной $1,5$ мкм более чем в 3 раза выше, чем у концентраторов с толщиной $0,15$ мкм (рис. 4). При этом индукция B магнитного поля на границе полосок (по координатам зазора — точки 0 и 5) составляет следующие значения: 58 мТл для толщины $1,5$ мкм и 71 мТл для толщины $0,15$ мкм. Таким образом, модель показывает, что увеличение магнитной индукции в структуре тонких полосок выше, чем в толстых. Более резкий спад магнитного поля в зазоре тонких пленок происходит быстрее, чем в зазоре толстых. Это объясняется тем, что коэффициент усиления концентраторов магнитного поля пропорционален отношению их длины к ширине зазора (a/L) и достигает максимума при ширине зазора, равной толщине концентратора, при этом с увеличением длины концентратора увеличивается и коэффициент усиления [6].

На рис. 5 показано изменение распределения магнитного поля при увеличении зазора L между полосками концентратора магнитного поля с 5 до 10 мкм. На данном рисунке видно, что при одинаковой толщине пленок с увеличением зазора между ними происходит снижение магнитной индукции в середине зазора с 3,4 до 2,0 мТл.

Таким образом, чтобы получить эффективную структуру концентраторов для усиления магнитного поля в зазоре, где располагается магниточувствительный элемент, необходимо соблюдение пропорций между толщиной полосок пермаллоя и зазором между ними. Следует учитывать также, что при минимизации зазора сталкиваются с ограничением из-за противоречивых требований по формированию магниторезистивного элемента, который должен располагаться в этом зазоре. Поэтому исходя из реальных геометрических размеров магниторезистивных полосок, которые могут быть сформированы с помощью оптической фотолитографии, и номинала магниторезистивного моста, а также с учетом всех топологических ограничений по зазорам и перекрытиям зазор должен составлять не менее 20 мкм. Соответственно, толщина пленок пермаллоя должна составлять не менее 10 мкм, и способ их формирования должен обеспечивать более высокие скорости осаждения, чем магнетронный. Учитывая все факторы и процессы, происходящие в структуре магниторезистивного преобразователя с концентраторами магнитного поля, можно добиться более высокой его чувствительности за счет усиления слабого магнитного поля в области магниточувствительного элемента.

Электрохимическое осаждение пермаллоя на кремниевые пластины

Для формирования микроконцентраторов магнитного поля толщиной не менее 10 мкм требуется маска, определяющая их конфигурацию, и совместимость с интегральной технологией изготовления магниторезистивных преобразователей. На первом этапе решения данной задачи были проведены экспериментальные работы, которые позволили сделать выбор наиболее подходящего полимерного материала, обеспечивающего конфигурацию высотой 10...15 мкм под электрохимическое осаждение пермаллоя.

Электрохимическое осаждение (ЭХО) пермаллоя проводится с использованием электролита, в состав которого входят соли, содержащие ионы никеля и железа (NiSO_4 и $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), и комплексообразователь H_3BO_3 . На рис. 6 представлена зависимость состава пленки пермаллоя от плотности тока электрохимической реакции, протекающей в вышеуказанном электролите. Из представленного на рисунке графика можно определить плотности тока для необходимого состава пермаллоя (14 mA/cm^2).

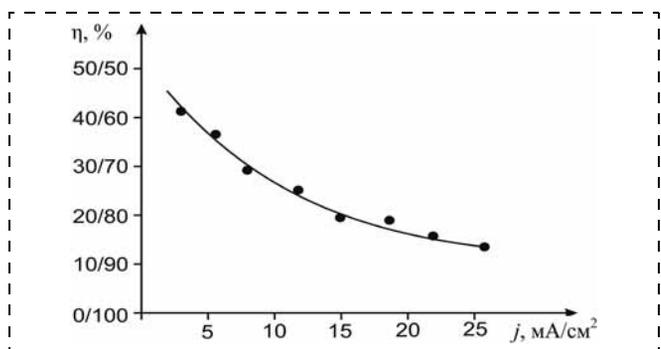


Рис. 6. Зависимость состава пленки пермаллоя от плотности тока

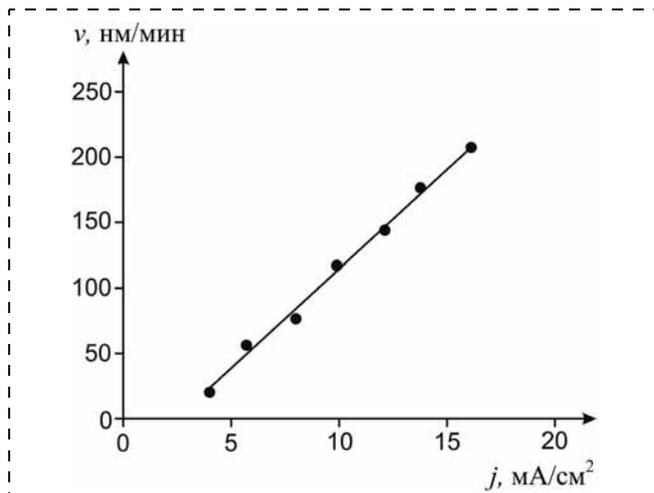


Рис. 7. Зависимость скорости осаждения пленок пермаллоя от плотности тока

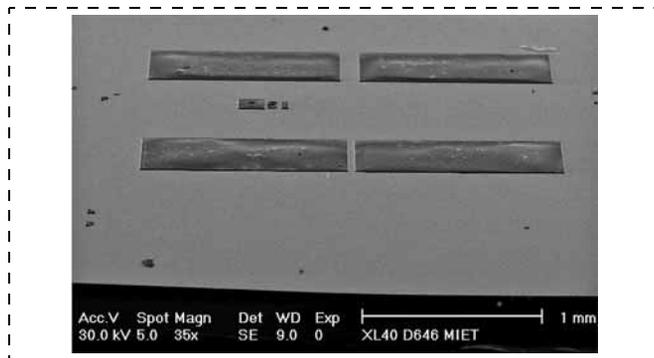


Рис. 8. Фотоснимок тестовых полосок из пермаллоя толщиной 10...11 мкм, сделанный с помощью РЭМ

На рис. 7 представлена зависимость скорости осаждения пленок пермаллоя требуемого состава от плотности тока. Из представленной зависимости можно определить скорость осаждения пермаллоя на уровне 170...180 нм/мин.

В результате проведения ЭХО на кремниевых пластинах, помещенных в специализированную оснастку, были получены тестовые полоски из пермаллоя с различными зазорами между ними для создания микроконцентраторов магнитного поля. На рис. 8 приведен фотоснимок тестовых полосок из пермаллоя толщиной 10...11 мкм, эмитирующих микроконцентраторы магнитного поля, которые могут быть сформированы на поверхности кремниевой пластины методом электрохимического осаждения.

В процессе изготовления тестовых полосок из пермаллоя методом ЭХО была выявлена возможность придания им определенной формы края с положительным углом наклона у основания (рис. 9). Эта конфигурация позволит локализовать магнитные поля в области магниточувствительного элемента, сформированного в плоскости основания полоски.

В пластинах с тестовыми полосками были сформированы области размером 10 × 10 мм из этой же осажденной пленки пермаллоя для оценки магнитных параметров данного материала. Эти области с помощью алмазного диска вырезали из пластины, помещали в специализированную оснастку и исследовали на специализированном стенде.

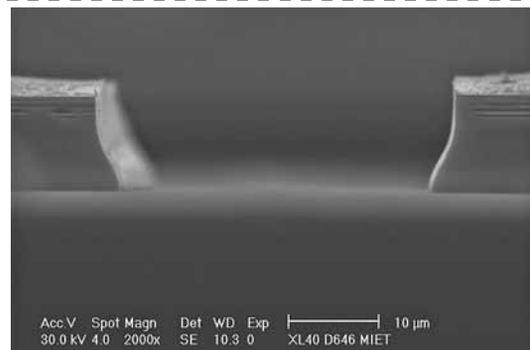


Рис. 9. Фотоснимок краев микроконцентраторов магнитного поля

В результате исследований магнитных характеристик на специализированном стенде было установлено, что для осажденного слоя пермаллоя толщиной 10...11 мкм петля гистерезиса симметричная, а коэрцитивная сила составляет 0,7...1,9 Э. Эти данные свидетельствуют об однородности магнитных свойств полученных пленок пермаллоя и возможности использования их в качестве концентраторов магнитного поля.

Структура приемника магнитного сигнала беспроводной МЭМС на основе магниторезистивных элементов

Приемником магнитного сигнала может быть высокочувствительный магниторезистивный (МР) преобразователь, изготовленный по тонкопленочной технологии. Концентраторы магнитного поля, интегрированные в его конструкцию, позволяют усилить магнитное поле в зазоре более чем в 10 раз, что пропорционально повышает чувствительность данного преобразователя и расширяет его динамический диапазон в область слабых магнитных полей. Кроме того, протяженные полоски тонкопленочного концентратора магнитного поля выполняют функцию направленной антенны магнитного поля и позволяют определять расположение источника сигнала. На рис. 10 приведена структурная схема приемника магнитного сигнала беспроводной МЭМС на основе мостовой схемы из магниторезистивных элементов.

Особенностью конструкции приемника магнитного сигнала, построенного на основе тонкопленочной магниторезистивной технологии и электрохимическо-



Рис. 10. Структурная схема приемника магнитного сигнала беспроводной МЭМС

го осаждения пленки пермаллоя для интегральных микроконцентраторов магнитного поля, является миниатюрность. В процессе формирования микроконцентраторов магнитного поля методом ЭХО на завершающей стадии изготовления МР преобразователя обеспечивается достаточная защита наиболее уязвимых металлических проводников в межэлементных соединениях на поверхности кристалла и контактных площадок. Это позволяет в перспективе разработать совмещенную технологию изготовления однокристалльной беспроводной МЭМС, включающей электронные схемы и микромеханические элементы.

Заключение

Магнитная связь обладает рядом преимуществ в определенных областях применения. Для разработки и изготовления устройств беспроводной передачи информационных сигналов с помощью магнитной связи необходима современная электронная компонентная база. Одним из основных компонентов беспроводных устройств с магнитной связью является приемник. Он может быть реализован на основе высокочувствительного магниторезистивного преобразователя. Для повышения чувствительности магниторезистивного преобразователя в состав его конструкции могут быть интегрированы микроконцентраторы магнитного поля, усиливающие его значение в десятки раз.

В результате моделирования распределения магнитного поля в структуре пленочного концентратора и у его границ были установлены коэффициенты усиления в зависимости от зазора между полосками пермаллоя. Исходя из конструктивно-технологических ограничений кристалла высокочувствительного магниторезистивного преобразователя определены общие требования к толщине полосок пермаллоя и зазору между ними. Эксперименталь-

ное проведение электрохимического осаждения пермаллоя с использованием полимерной маски на пластины кремния диаметром 100 мм показало, что полученные тестовые полоски пленки пермаллоя имеют толщину 10...11 мкм, осажденная пленка обладает однородными магнитными свойствами, а коэрцитивная сила составила 0,7...1,9 Э.

Исследование параметров формируемых структур осуществлялось с помощью измерительных приборов центра коллективного пользования "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" на базе НПК "Технологический центр", финансово поддержанном Министерством образования и науки Российской Федерации, в рамках ФЦП "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008—2015 годы (государственный контракт № 16.426.11.0033).

Список литературы

1. **Технология** LibertyLink — потенциальный убийца Bluetooth. URL: <http://www.ixbt.com/editorial/bkiller.shtml>
2. **Конфиденциальная** беспроводная цифровая магнитная связь на короткие расстояния. URL: <http://www.telemultimedia.ru/art.php?id=164&print>
3. **Спасительная** связь: Магнитный телефон. URL: <http://chermet.com.ru/news/spasitelnava-svyaz-magnitnyy-telefon.html>
4. **Амеличев В. В., Аравин В. В., Вернер В. Д., Резнев А. А., Решетников И. А.** Перспективы применения тонкопленочных магниторезистивных наноструктур в многокристалльных беспроводных МЭМС // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Матер. IX научно-техн. конф. М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2010. С. 152—153.
5. **Driljaca P. M., Vincent F., Besse P. A., Popovic R. S.** Design of planar magnetic concentrators for high sensitivity Hall devices // Sensors and Actuators A. Physical. 2002. Vol. 97. April. P. 10—14.
6. **Shneider M., Castangetti R., Allen M. G., Baltès H.** Integrated flux concentrator improves CMOS magnetotransistor // IEEE, 1995. P. 151—156.

УДК 621.282.001.63

С. Г. Новиков, канд. техн. наук, доц.,
e-mail: novikovsg@ulsu.ru,
Н. Т. Гурин, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф.,
первый проректор, проректор по учебной работе,
А. В. Беринцев, науч. сотр.,
В. А. Родионов, науч. сотр.,
А. А. Штанько, науч. сотр.,
Ульяновский государственный университет

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ КООРДИНАТ И УГЛОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

Представлена в редакцию 20.07.2012

Рассмотрены полупроводниковые функциональные фотопреобразователи координат и углов с отрицатель-

ной дифференциальной проводимостью (ОДП), реализованные на основе комбинированного прибора с ОДП и двух типов полупроводниковых координатно-чувствительных фотоприемников — линейной и дуговой геометрической формы. Приведены результаты сравнительных экспериментальных исследований. Указаны возможные области применения.

Ключевые слова: фотопреобразователь, координатная фоточувствительность, отрицательная дифференциальная проводимость

Проектирование и разработка современных устройств мехатроники и микросистемной техники требуют создания принципиально новых типов базовых функциональных электронных элементов и компонентов, к которым относятся первичные сенсоры и датчики полей и излучений, элементы функционального преобразования физических величин, а также устройства коммутации различных исполнительных механизмов с источниками постоянного и переменного напряжения и тока. К таким элементам и компонентам предъявляются по-

вышенные требования по чувствительности, функциональности, массогабаритным показателям и надежности. Одними из перспективных базовых элементов для современных сенсоров, преобразователей и коммутаторов являются полупроводниковые приборы с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП), представляющие собой твердотельные интегральные или комбинированные приборы, реализованные на базе структур полупроводниковых биполярных или полевых транзисторов [1, 2].

Приборы с ОДП обладают высокой фоточувствительностью [3], в том числе и позиционной [4], что обеспечивает их использование в качестве эффективных сенсоров, датчиков и преобразователей физических величин, а также двумя и более устойчивыми состояниями с малым и большим внутренним сопротивлением, которые позволяют применять их в качестве ключевых элементов, работающих на постоянном и переменном токе [5].

В данной статье рассмотрены комбинированные полупроводниковые координатно-чувствительные функциональные фотопреобразователи координат и углов с ОДП. Данные приборы отличаются тем, что сочетают в себе функции первичного сенсора — координатно-чувствительного фотоприемника — и коммутирующего элемента — прибора с ОДП [6]. При этом они способны выполнять функциональные преобразования координат или углов в такие характеристики коммутирующего элемента, как ток пика, напряжения пика или значение ОДП.

Полупроводниковые координатно-чувствительный фотопреобразователи с ОДП (рис. 1) реализованы на основе комбинированного прибора с ОДП (N-прибор) и координатно-чувствительного фотоприемника (КЧФ), который выполнен в двух вариантах: линейном [7] и дуговым [8].

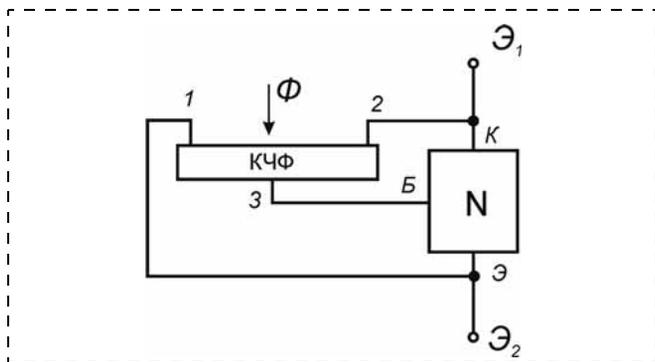


Рис. 1. Структурная схема двухполюсного координатно-чувствительного фотопреобразователя с ОДП

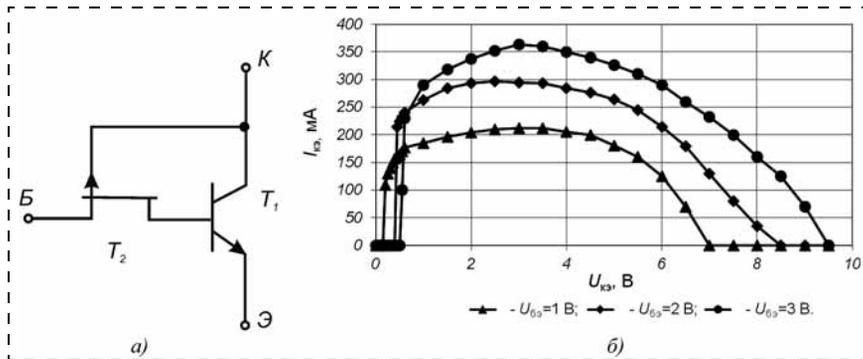


Рис. 2. Биполярно-полевой N-прибор (а) и семейство его ВАХ (б)

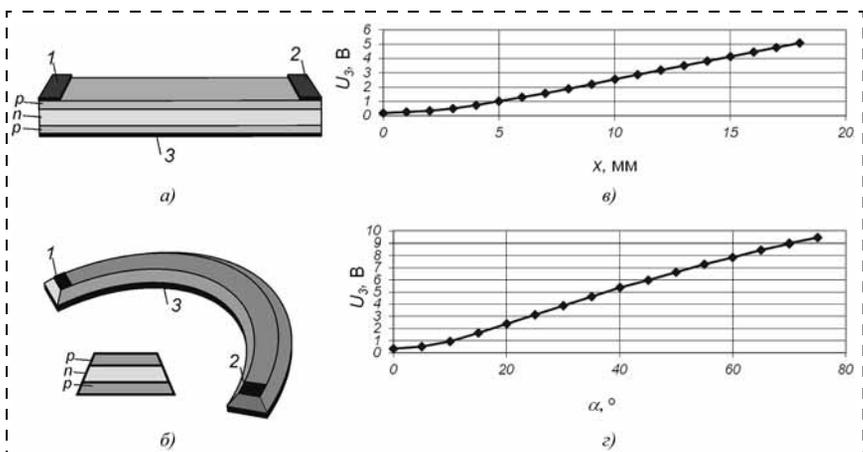


Рис. 3. Полупроводниковые структуры КЧФ:

а — линейная; б — дуговая; в, г — зависимости выходного сигнала от координаты и угла соответственно

N-прибор может быть реализован на основе дискретных элементов (рис. 2, а), а участок ОДП на его вольт-амперной характеристике (ВАХ) появляется вследствие модуляции тока базы биполярного транзистора [1, 2]. Выбор биполярно-полевого прибора с ОДП обусловлен тем, что его управление осуществляется приложенным к базе напряжением.

Цепь положительной обратной связи по напряжению в данном приборе образована полевым транзистором T_2 , включенным между электродами коллектора и базы биполярного транзистора T_1 . Его выходная ВАХ в схеме с общим эмиттером, управляемая током базы, зависит от входного напряжения база—эмиттер и сопротивления канала полевого транзистора. Из-за наличия на $p-n$ -переходе затвора напряжения коллектор—эмиттер он смещен в обратном направлении, и с ростом этого напряжения происходит увеличение сопротивления канала, а следовательно, и уменьшение тока базы. Это вызывает уменьшение коллекторного тока и появление участка отрицательной проводимости на выходной ВАХ [7] (рис. 2, б).

КЧФ представляет собой $p-n-p$ -структуру с тремя омическими контактами (рис. 3), два (1 и 2) из которых расположены по краям верхнего фоточувствительного слоя, служащего эмиттером и одновременно делителем напряжения источника. Третий (3) является контактом к эквипотенциальной нижней области полупроводника, служащей коллек-

тором [7]. Реализованы два типа КЧФ — линейной и дуговой геометрической формы (рис. 3, *a*, *б*). Зависимости выходного напряжения на третьем электроде U_3 от координаты для линейного КЧФ и угла для дугового КЧФ представлены на рис. 3, *в* и *г*. Зависимости носят линейный характер, что позволяет реализовывать простые преобразования координат и углов в электрические величины.

КЧФ включен в цепь управления N-прибора таким образом (см. рис. 1), что контакт 1 к фоточувствительной области полупроводникового КЧФ соединен с эмиттерным электродом Э прибора с ОДП, контакт 2 к фоточувствительной области соединен с коллекторным электродом К, а контакт 3 полупроводникового КЧФ соединен с базовым электродом Б прибора с ОДП; Э₁ и Э₂ — электроды двухполюсного КЧФ с отрицательной проводимостью; Ф — световой пучок (световой зонд), падающий на поверхность КЧФ. За счет рассматриваемой схемы соединения реализуется двухполюсный комбинированный координатно-чувствительный фотодатчик, обладающий ВАХ, содержащей участок отрицательной проводимости.

В отсутствие освещения поверхности КЧФ (см. рис. 1) (при отсутствии управляющего напряжения на базовом электроде N-прибора) на его выходной ВАХ участка ОДП не наблюдается. Появление и движение светового зонда по поверхности КЧФ обеспечивает изменение напряжения на базовом электроде и, как следствие, появление на выходной ВАХ фотопреобразователя участка ОДП. С изменением координат светового зонда происходит изменение параметров выходной характеристики.

В экспериментальных образцах КЧФ с ОДП для реализации N-прибора были использованы биполярные транзисторы типа КТ 3107, полевые транзисторы типа КП 302.

КЧФ реализованы линейной и дуговой геометрической формы (рис. 3, *a*, *б*). Линейный КЧФ представляет собой полупроводниковую *p-n-p*-структуру шириной 1,2 мм и толщиной 280 мкм, с двумя *p-n*-переходами, реализованными на глубинах 53 и 233 мкм в объеме полупроводника *n*-типа проводимости с сопротивлением 30 Ом·см. Удельное сопротивление *p*-областей составляет 250 Ом·см. На верхней фоточувствительной поверхности полупроводникового КЧФ размещены два металлических электрода (по краям линейной структуры) для подключения источника питания, на противоположной стороне кристалла — третий выходной электрод. Дуговой КЧФ представляет собой аналогичную линейной полупроводниковую *p-n-p*-структуру шириной 1,5 мм с сечением трапециевидальной формы, радиусом 14 мм и толщиной 250 мкм.

N-прибор и линейный КЧФ располагаются в одном корпусе с прозрачным окном и тремя электрическими выводами, к которым подключается внешний источник питания и измерительная аппаратура. Засветка световым зондом и его перемещение вдоль структуры осуществляется через прозрачное окно.

N-прибор, дуговой КЧФ и ИК излучатель, формирующий световой зонд, располагаются в одном корпусе с пятью электрическими выводами, к которым подключаются источник питания излучателя, внешний источник питания фотопреобразователя и измерительная аппаратура. ИК излучатель расположен на поворачивающемся относительно общей оси основания таким образом, что световой зонд перемещается по окружности относительно неподвижного дугового КЧФ вдоль его поверхности. В качестве источника излучения используется ИК диод типа АЛ 107Б. Диаметр светового зонда составляет 2 мм. Ток ИК диода во всех экспериментах составлял 40 мА.

Полученные таким образом образцы представляют собой полупроводниковые функциональные фотопреобразователи координат и углов с ОДП. Выходные ВАХ в зависимости от координат и углов, определяющих положение светового зонда над поверхностью КЧФ, представлены на рис. 4.

Наличие участка ОДП на ВАХ наблюдается не во всем диапазоне изменения координат и углов.

При малых значениях координат и углов ВАХ не содержат участка ОДП, что обусловлено напряжениями на выходе КЧФ ниже пороговых значений для N-прибора. При увеличении значения координат (выше 12 мм) в случае линейного фотопреобразователя происходит выход ВАХ на участок вторичной положительной ветви с исчезновением участка ОДП. Та же картина наблюдается при уменьшении угла поворота менее 10° в случае дугового фотопреобразователя. В результате зависимости параметров ВАХ от координаты (или угла) центра светового пучка носят пороговый характер. Появление участка ОДП на ВАХ происходит только при достижении некоторого минимального значения координаты (угла), соответствующего минимальному значению управляющего напряжения на базовом электроде прибора с ОДП, при котором начинается изменение сопротивления канала полевого транзистора. При достижении определенного максимального значения координаты происходит исчезновение участка ОДП на ВАХ, что связано со смещением напряжения максимума в область напряжения пробоя, которое определяется напряжением пробоя биполярно-полевого прибора с ОДП.

Таким образом, наблюдаемые ВАХ содержат участки ОДП только в определенном диапазоне координат и углов. Данное обстоятельство позволяет использовать рассматриваемые фотопреобразователи в составе электрических цепей в различных режимах работы при одном и том же сопротивлении нагрузки — в моностабильном (нагрузочная прямая пересекает ВАХ в одной точке), бистабильном (нагрузочная прямая пересекает ВАХ в трех точках) и генераторном (нагрузочная прямая пересекает ВАХ в одной точке на участке ОДП), и изменение режима осуществляется перемещением светового зонда вдоль поверхности КЧФ в составе фотопреобразователя. При этом в качестве выходного сигнала фотопреобразователя может быть изменение выходного тока, переключение фотопреобразова-

теля из состояния с низким выходным сопротивлением в состояние с высоким выходным сопротивлением, или наоборот, а также изменение частоты генерации выходного сигнала.

Зависимость ОДП фотопреобразователей от координаты светового зонда и углов поворота зонда приведены на рис. 5.

На полученных зависимостях ОДП от координат и углов поворота светового зонда относительно поверхности КЧФ наблюдается максимумы, соответствующие примерно серединам диапазонов измеряемых координат и углов. Таким образом, по данным экстремальным значениям ОДП можно осуществлять калибровку систем наведения и позиционирования, реализованных на основе рассматриваемых фотопреобразователей.

При проведении температурных исследований установлено, что в диапазоне температур от 22 до 65 °С рассматриваемые фотопреобразователи практически не изменяют своих характеристик, однако при дальнейшем увеличении температуры происходит снижение тока максимума, что связано со снижением яркости светоизлучающих диодов в составе преобразователей.

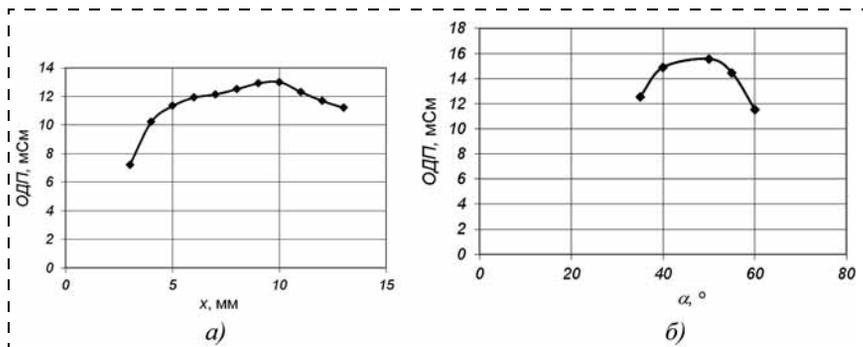


Рис. 5. Зависимость ОДП фотопреобразователей от координаты светового зонда (а), и углов поворота (б)

Полученные результаты показывают возможность создания комбинированных датчиков перемещений и поворота, обладающих переключательными свойствами. Такие датчики с расширенными функциональными возможностями можно использовать в различных устройствах автоматики, мехатроники и микросистемной техники в качестве элементов управления исполнительными механизмами и координатных пороговых датчиков в системах управления и контроля поворота и перемещений. При использовании таких фотопреобразователей в составе генераторов электрических колебаний также возможно преобразование координат и углов в частоту. Малые массогабаритные показатели фотопреобразователей, простота электрической схемы позволяют реализовать подобные приборы в виде интегральной схемы и использовать в составе МЭМС различного назначения.

Работа поддержана грантами ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 годы.

Список литературы

1. Chua L. O., Yu J., Yu Y. Bipolar-JFET-MOSFET Negative Resistance Devices // IEEE. Transactions on Circuits and Systems. 1985. N 1. P. 46–61.
2. Новиков С. Г., Гурин Н. Т. Схемотехнические аналоги симметричных негаторов // Микросистемная техника. 2004. № 12. С. 27–30.
3. Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Каштанкин И. А. Фотоприемник с отрицательной проводимостью на основе полупроводниковой структуры. Пат. РФ № 2309487 от 2007.
4. Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Корнеев И. В. и др. Двухполюсный полупроводниковый позиционно-чувствительный фотоприемник с отрицательной дифференциальной проводимостью. Пат. РФ № 2445725 от 7.10.2010.
5. Каштанкин И. А., Гурин Н. Т. Фоточувствительный кремниевый биполярный N-прибор с управляемой вольт-амперной характеристикой // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, вып. 13. С. 46–49.
6. Гурин Н. Т., Новиков С. Г., Корнеев И. В. и др. Позиционно-чувствительный фотоприемник для фотоэлектрических преобразователей углов поворота // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 6. С. 57–62.
7. Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Корнеев И. В., Родионов В. А. Двухполюсный позиционно-чувствительный фотодатчик с отрицательной дифференциальной проводимостью // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 12. С. 35–37.
8. Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Корнеев И. В. и др. Фотоэлектрический преобразователь угловых величин // Датчики и системы. 2011. № 11. С. 54–59.

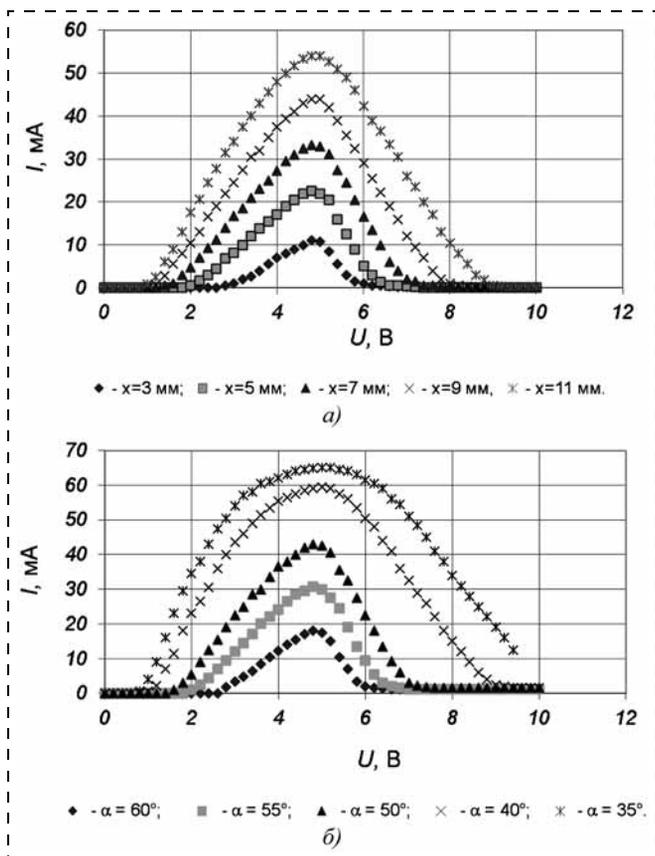


Рис. 4. Семейство выходных ВАХ: а — фотопреобразователя координат; б — фотопреобразователя углов

Д. А. Бурдин¹, стажер-исследователь,
 Ю. К. Фетисов¹, д-р физ.-мат. наук, проф.,
 e-mail: fetisov@mirea.ru,
 Д. А. Чашин¹, вед. инженер,
 Н. А. Экономов¹, канд. физ.-мат. наук, доц.,
 Е. М. Савченко², канд. техн. наук, зав. отделом
¹ Московский государственный технический
 университет радиотехники, электроники и
 автоматики "МГТУ МИРЭА"
² Федеральное государственное унитарное
 предприятие "НПП "Пульсар"

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПЛАНАРНОЙ ВОЗБУЖДАЮЩЕЙ КАТУШКОЙ

Поступила в редакцию 23.08.2012

Изготовлен и исследован пьезоэлектрический датчик постоянного магнитного поля, использующий комбинацию силы Ампера, пьезоэффекта и акустического резонанса. Датчик представляет собой биморфную пластину из цирконата-титаната свинца, один конец которой закреплен, а на другом расположена планарная электромагнитная катушка. При пропускании через катушку тока с частотой, равной частоте изгибных колебаний пластины, пьезоэлектрик генерирует переменное напряжение, амплитуда которого пропорциональна постоянному полю. Датчик имеет чувствительность ~ 200 В/(А·Тл) в диапазоне полей $\sim 10^{-7} \dots 0,3$ Тл и диапазоне температур 220...370 К.

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

Введение

В последние годы значительно вырос интерес к пьезоэлектрическим (ПЭ) датчикам постоянных магнитных полей нового типа, которые отличаются высокой чувствительностью, широким диапазоном измерений, возможностью электронного управления параметрами датчика, простотой конструкции и поэтому могут составить реальную конкуренцию широко применяемым полупроводниковым датчикам на эффекте Холла. Принцип действия ПЭ датчиков основан на комбинации силы Ампера, действующей на проводник с текущим по нему током, и пьезоэффекта в ПЭ элементе [1–2]. Сила Ампера $F_A \sim IB$ передается от проводника к пьезоэлектрику, вызывает его деформацию, и между электродами последнего генерируется электрическое напряжение u , которое пропорционально индукции магнитного поля B и току I . Особый интерес представляют ПЭ датчики резонансного типа, где переменный ток возбуждает механические колебания рабочего элемента, что приводит к увеличению

деформаций в пьезоэлектрике и повышению чувствительности датчика примерно на 2 порядка [3].

К настоящему времени предложены и исследованы несколько конструкций резонансных датчиков магнитного поля с ПЭ элементами различной формы, использующих разные виды механических колебаний и способы их возбуждения. Датчик в форме радиально поляризованного кольца из цирконата-титаната свинца (PZT) с электродами на внутренней и внешней поверхностях (один из которых служил токовым проводником) на частоте радиальных колебаний 60 кГц имел чувствительность $u/(IB) \sim 2$ В/(А·Тл) [4]. Датчик в виде закрепленной на одном конце биморфной PZT-пластины, по среднему электроду которой пропускали возбуждающий ток, на частоте изгибных колебаний 153 Гц показал чувствительность ~ 100 В/(А·Тл) [5, 6]. Датчик в виде такой же биморфной PZT-пластины, которую возбуждали с помощью намотанной на нее объемной катушки, на частоте изгибных колебаний 1,14 кГц продемонстрировал чувствительность ~ 250 В/(А·Тл) [7]. Датчики в виде биморфной PZT-консоли с объемной многovitковой катушкой на свободном конце консоли показали еще на порядок большую чувствительность [8].

В данной работе описан технологичный в изготовлении резонансный ПЭ датчик постоянного магнитного поля на основе биморфной PZT-пластины, в котором для возбуждения изгибных колебаний пластины использована планарная электромагнитная катушка. Катушка сформирована методами фотолитографии на диэлектрической пленке и затем приклеена на поверхность PZT-пластины. Проведены измерения характеристик датчика в широком диапазоне постоянных магнитных полей при различных токах возбуждения. Измерены температурные характеристики и выполнены оценки рабочей частоты и чувствительности датчика.

Принцип работы и конструкция датчика

Конструкция датчика схематически изображена на вставке рис. 1. Основным элементом датчика является биморфная пластина, содержащая два ПЭ слоя и металлические электроды, один из которых

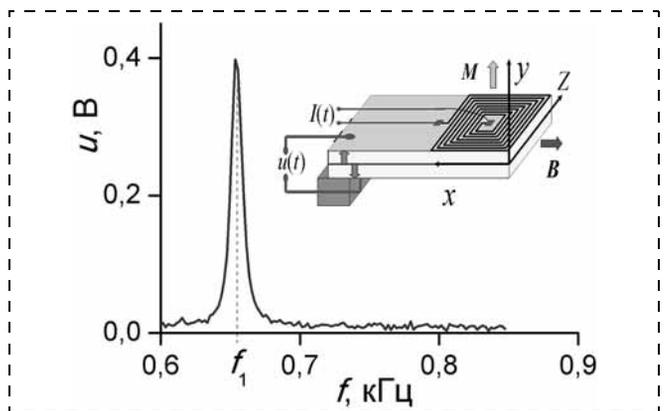


Рис. 1. Зависимость напряжения u с датчика от частоты f тока через катушку при магнитной индукции $B = 0,1$ Тл и токе $I = 20$ мА. На вставке схематически изображена конструкция датчика

расположен между слоями, а два других — на свободных поверхностях пластины. Один конец пластины закреплен на основании, а другой — свободен. На поверхности пластины вблизи ее свободного конца расположена возбуждающая планарная катушка, через которую протекает переменный электрический ток $I \cos(2\pi ft)$ с частотой f и амплитудой I . Датчик помещен в постоянное магнитное поле B , направленное вдоль длинной стороны пластины. Текущий через катушку ток создает переменный магнитный момент M , который взаимодействует с полем B и стремится повернуть катушку. В результате биморфная пластина совершает изгибные колебания, и между ее внешними электродами генерируется напряжение $u \cos(2\pi ft)$ с амплитудой u , пропорциональной магнитной индукции B .

Пластина ПЭ датчика была изготовлена в ОАО "НИИ "Элпа" методами керамической технологии из PZT с температурой спекания 950 °С. Длина пластины вдоль оси x составляла $l = 16$ мм (длина свободной части $L = 14$ мм), ширина вдоль оси z — $a = 8$ мм, а толщина каждого слоя равнялась $h/2 = 0,1$ мм. Толщина Pd—Ag электродов не превышала 4 мкм. Слои поляризовали навстречу друг другу путем нагрева до 100 °С, приложения к электродам напряжения 200 В и последующего охлаждения до комнатной температуры. Возбуждающая катушка была изготовлена методами фотолитографии на диэлектрической пленке толщиной 30 мкм и приклеена на поверхность пластины вблизи ее свободного конца. Катушка с наружными размерами 8×8 мм содержала 10 концентрических витков из медного микрополоска шириной 100 мкм и толщиной 20 мкм. Сопротивление катушки равнялось 1,5 Ом, а индуктивность — 0,76 мкГн. Через катушку от генератора ГЗ-117 пропускали переменный ток с амплитудой $I = 0...100$ мА и частотой $f = 10$ Гц...6 кГц. Датчик помещали в постоянное магнитное поле с магнитной индукцией $B = 0...0,3$ Тл, созданное электромагнитом. Генерируемое между электродами биморфной пластины напряжение u регистрировали с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS 3032B. Измеряли зависимости u от частоты f , амплитуды I тока через катушку и магнитной индукции B . В ходе измерений температуру датчика изменяли в диапазоне 200...400 К и контролировали с точностью ~1 К путем охлаждения или нагрева в потоке газообразного азота.

Характеристики датчика

На рис. 1 показана зависимость $u(f)$ амплитуды генерируемого датчиком напряжения от частоты возбуждающего тока f при магнитной индукции $B = 0,1$ Тл и токе $I = 20$ мА, измеренная при комнатной температуре. Пик с амплитудой $u_1 = 0,4$ В и добротностью $Q \approx 100$ вблизи частоты $f_1 = 0,654$ кГц, как будет показано ниже, возникает из-за резонансного увеличения деформаций в биморфной PZT-пластине при совпадении частоты тока с частотой нижней моды изгибных колебаний пластины.

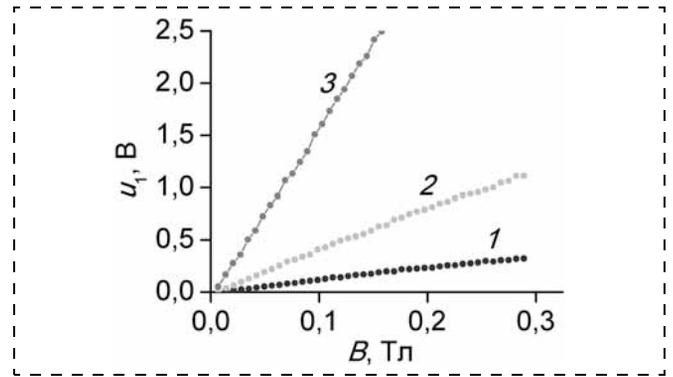


Рис. 2. Зависимость напряжения с датчика u_1 на частоте резонанса f_1 от поля B при разных токах через катушку I , мА: 1 — 5; 2 — 20; 3 — 100

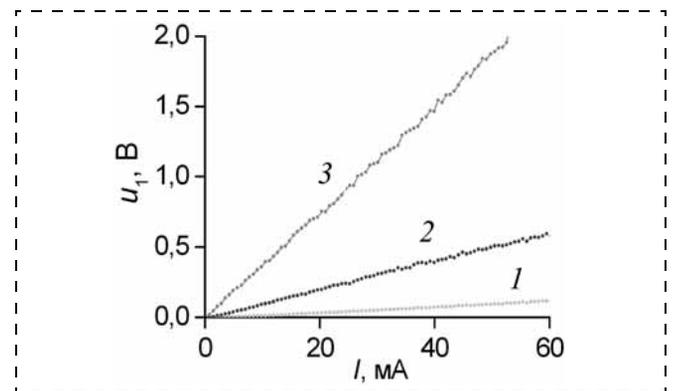


Рис. 3. Зависимость напряжения u_1 с датчика на частоте резонанса f_1 от тока I через катушку при разных магнитных индукциях B , Тл: 1 — 0,01; 2 — 0,05; 3 — 0,2

На рис. 2 приведены зависимости напряжения с датчика u_1 от магнитной индукции B на частоте резонанса f_1 при различных значениях возбуждающего тока, измеренные при комнатной температуре. На рис. 3 изображены аналогичные зависимости напряжения с датчика u_1 от амплитуды тока I на частоте резонанса f_1 при различных магнитных индукциях B . Зависимости на рис. 2 и рис. 3 практически линейны в исследованном диапазоне изменения магнитной индукции и токов. Чувствительность датчика $K = U/IB$, рассчитанная по наклону кривых на рис. 2 и рис. 3, равна $K = (202 \pm 5)$ В/(А · Тл). Полученная чувствительность примерно в 2 раза превосходит чувствительность датчика на основе PZT-биморфа с линейным током (~100 В/(А · Тл)) [3] и сравнима с чувствительностью датчика на основе биморфной PZT-пластины с объемной возбуждающей катушкой (~250 В/(А · Тл)) [3]. Установлено, что сигнал с датчика уменьшается по закону $\sim u_1 \cos(\alpha)$ при увеличении угла α между направлением магнитной индукции B и плоскостью PZT-пластины, что позволяет использовать датчик для определения направления поля.

Для применений важно знать зависимость характеристик датчика от температуры. На рис. 4 приведены измеренные зависимости частоты f_1 , добротности резонанса Q_1 и амплитуды выходного

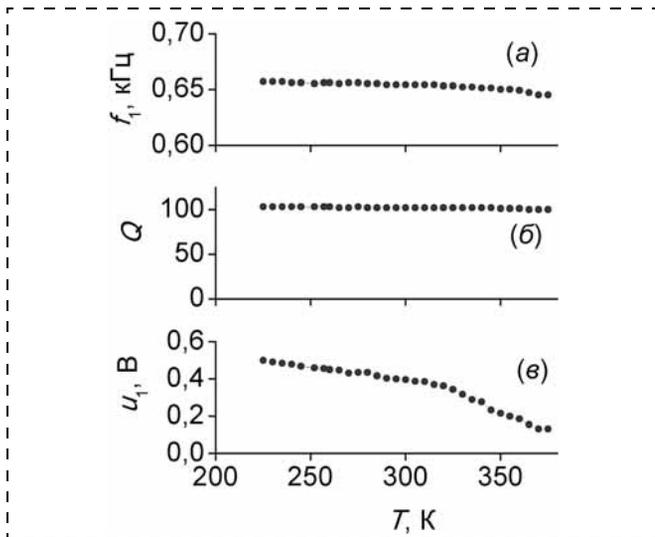


Рис. 4. Измеренные зависимости: резонансной частоты f_1 (а), добротности резонанса Q (б), напряжения с датчика u_1 (в) от температуры T

сигнала u_1 описанного датчика от температуры T в поле с магнитной индукцией 0,1 Тл при амплитуде возбуждающего тока 20 мА. Видно, что с увеличением T в интервале 225...375 К резонансная частота уменьшается на ~1,8 %, добротность резонанса практически не изменяется, а амплитуда генерируемого датчиком сигнала монотонно падает в ~4 раза.

Оценки и обсуждение результатов

Рабочую частоту датчика оценим, используя формулу для частоты малых изгибных колебаний пластины прямоугольного сечения, жестко закрепленной на одном конце:

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

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 пластины, получаем частоту низшей моды колебаний $f_r = 0,676$ кГц, хорошо совпадающую с измеренной 0,654 кГц. Отличие рассчитанных и измеренных частот обусловлено конечной массой возбуждающей катушки, которая не учитывалась в расчетах.

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

Протекающий по планарной катушке квадратной формы ток I создает переменный магнитный момент с амплитудой $p_m = (1/3)Ni a^2$, где a — сторона и N — число витков катушки. В магнитном поле на катушку

действует механический вращающий момент $M = p_m B$. Будем считать, что момент приложен в центре катушки, т. е. на расстоянии $x = a/2$ от свободного конца пластины. Момент создает в области $a/2 < x < L$ пластины касательные механические напряжения, значения которых постоянны вдоль оси x и линейно изменяются по толщине пластины:

$$T_x(x, y) = \frac{M}{J} y. \quad (2)$$

При изгибе биморфной пластины, у которой средний электрод расположен в центральной плоскости, один слой пьезоэлектрика растягивается ($T_x > 0$), а другой — сжимается ($T_x < 0$). В слое пьезоэлектрика компоненты деформации S и электрической индукции D связаны с компонентами механического напряжения T и напряженностью электрического поля E [9]:

$$S_x = s_{xx} T_x + d_{31} E_y; \quad (3)$$

$$D_y = d_{31} T_x + \epsilon \epsilon_0 E_y,$$

где d_{31} , ϵ , s_{xx} — пьезомодуль, диэлектрическая проницаемость и податливость пьезоэлектрика соответственно; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Для разомкнутой цепи ($D_y = 0$) из уравнений (3) получаем распределение напряженности поля E_y в пьезоэлектрике:

$$E_y(x, y) = -d_{31} T_x(x, y) / (\epsilon \epsilon_0). \quad (4)$$

Интегрируя выражение (4) с учетом формулы (2), принимая во внимание встречные направления поляризации слоев структуры и увеличение деформаций в Q (добротность) раз на частоте резонанса f_1 , получаем приближенное выражение для амплитуды напряжения u_1 , генерируемого биморфной структурой с планарной катушкой в магнитном поле:

$$u_1 = Q \frac{d_{31}}{\epsilon \epsilon_0} \frac{a}{h} NIB. \quad (5)$$

Оценка по формуле (5) при соответствующих эксперименту значениях параметров ($d_{31} \approx 190 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, $\epsilon \approx 2 \cdot 10^3$), измеренной добротности $Q \approx 100$, токе $I = 20$ мА и постоянной магнитной индукции $B = 0,1$ Тл дает амплитуду генерируемого напряжения ~0,8 В. Если учесть, что механические напряжения при изгибе возникают в области PZT-пластины длиной $L - a/2$, а электрический заряд распределяется по электродам на всей длине пластины l , то рассчитанная амплитуда генерируемого напряжения уменьшится еще в $(L - a/2)l$ раз, т. е. до ~0,5 В, что хорошо совпадает с измеренным значением 0,4 В (см. рис. 1). На основании изложенного теоретическая оценка чувствительности датчика равна ~250 В/(А · Тл), что согласуется с данными работ [7, 8] и результатами проведенных измерений.

Для объяснения зависимостей характеристик датчика от температуры (см. рис. 4) были дополнительно измерены температурные зависимости модуля Юнга Y и диэлектрической проницаемости

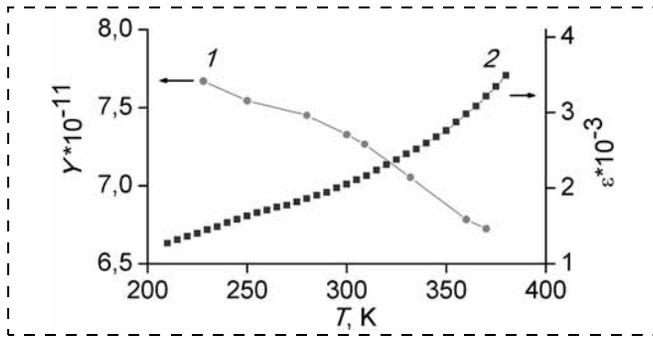


Рис. 5. Зависимости модуля Юнга Y (кривая 1) и диэлектрической проницаемости ϵ (кривая 2) PZT-керамики от температуры T

PZT-керамики ϵ . Измерения проводили на образце керамики того же состава с размерами $0,5 \times 4 \times 30$ мм. Модуль Юнга рассчитан по сдвигу частоты нижней моды планарных колебаний образца, а диэлектрическая проницаемость — по изменению емкости образца. Из рис. 5 следует, что с увеличением T от 225 до 375 К модуль Юнга Y керамики уменьшается на ~13 %, что, согласно формуле (1), и приводит к снижению резонансной частоты f_1 . В том же интервале температур относительная диэлектрическая проницаемость PZT ϵ возрастает от ~1400 до ~3350. Как видно из формулы (5), увеличение ϵ совместно с падением пьезомодуля d_{31} должно приводить к уменьшению амплитуды генерируемого датчиком напряжения, что и наблюдали экспериментально. Для создания термостабильных датчиков поля описанного типа необходимо использовать пьезоэлектрики, у которых модуль Юнга и диэлектрическая проницаемость не зависят от температуры, либо применять системы стабилизации температуры.

Значение минимальной регистрируемой датчиком магнитной индукции B_m найдем из условия равенства генерируемого сигнала амплитуде шумов $u_1 \approx u_{ш}$. Основной вклад в шумы вносит тепловой шум ПЭ слоя, амплитуда которого определяется формулой

$$u_{ш} = \sqrt{4k_B T \Delta f R}, \quad (6)$$

где $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T — температура; Δf — полоса частот шума; R — действительная часть импеданса PZT-слоя.

Подставляя в формулу (6) соответствующие эксперименту значения параметров ($T \approx 300$ К, $\Delta f \approx \approx f_1/Q = 6,5$ Гц, $R \approx 10^6$ Ом), получаем $u_{ш} \approx 0,1$ мкВ. При измеренной чувствительности датчика ~200 В/(А · Тл) и токе 20 мА значение минимальной регистрируемой магнитной индукции составляет $B_m \approx 10^{-7}$ Тл.

Отметим также, что размеры датчика могут быть пропорционально уменьшены, по крайней мере, на порядок без существенного снижения его чувствительности и ухудшения других рабочих характеристик.

Заключение

Таким образом, в работе исследован резонансный датчик постоянного магнитного поля на основе биморфной пьезоэлектрической структуры с планарной возбуждающей катушкой, который может быть изготовлен методами планарной технологии. Чувствительность датчика составляет ~200 В/(А · Тл), а минимальная регистрируемая магнитная индукция ~ 10^{-7} Тл, что сравнимо с характеристиками датчиков на основе эффекта Холла. Датчик имеет линейную зависимость выходного сигнала от магнитной индукции, возможность управления чувствительностью за счет изменения амплитуды возбуждающего тока и позволяет определять направление поля.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и Российского фонда фундаментальных исследований, грант 11-02-12241-офи-м-2011.

Список литературы

1. Jia Y., Tang Y., Zyaj X., Luo H. Additional dc magnetic field response of magnetostrictive/piezoelectric laminates due to Lorentz force effect // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. P. 126102.
2. 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.
3. Фетисов Ю. К., Чашин Д. В. Датчик магнитного поля. Патент на полезную модель № 94721, приоритет от 17 марта 2010 г.
4. Крыканов И. М., Коплик А. Б., Фетисов Ю. К., Чашин Д. В. Датчик постоянного магнитного поля на основе пьезоэлектрического кольца // Письма ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 18. С. 19—26.
5. Fetisov Y. K., Chashin D. V., Segalla A. G., Srinivasan G. Resonance magnetoelectric effects in a piezoelectric bimorph // J. of Appl. Phys. 2011. V. 110, P. 066101.
6. Фетисов Ю. К., Чашин Д. В., Лебедев С. В., Сегала А. Г., Итальянцев А. Г., Горнев Е. С. Пьезоэлектрический датчик магнитного поля на основе планарной биморфной структуры с током // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 4. С. 45—48.
7. Сопильняк А. А., Фетисов Ю. К., Лебедев С. В., Сегала А. Г. Пьезоэлектрический резонансный датчик магнитного поля на основе планарной биморфной структуры с возбуждающей электромагнитной катушкой // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 11. С. 33—37.
8. Итальянцев А. Г., Шульга Ю. В., Фетисов Ю. К., Чашин Д. В. Датчик постоянного магнитного поля на основе пьезоэлектрического преобразователя и многовиткового контура с током // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 6. С. 41—45.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.

В. А. Гридчин¹, д-р техн. наук, проф.,
М. А. Чебанов¹, ассистент,
 e-mail: chebanov100@gmail.com

В. Ю. Васильев^{1, 2}, д-р хим. наук, проф., зам.
 гендиректора,

¹Новосибирский государственный технический
 университет

²ООО "СибИС", г. Новосибирск

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ РЕЗОНАНСНЫХ СЕНСОРОВ ДАВЛЕНИЯ

Поступила в редакцию 13.08.2012

Представлены результаты моделирования влияния термических деформаций на частотные характеристики резонансного сенсора давления (РСД). Показана сильная зависимость температурной чувствительности сдвига резонансной частоты РСД от толщины оксидных пленок, используемых при изготовлении датчика. Предложен метод температурной компенсации резонирующего элемента пленкой SiO₂, сформированной на обратной стороне мембраны.

Ключевые слова: резонансный сенсор давления, термические деформации, метод конечных элементов

Введение

Резонансные сенсоры давления (РСД) обладают хорошей долговременной стабильностью, высокой чувствительностью и позволяют простым путем преобразовать выходной сигнал в цифровую форму. Благодаря этим качествам РСД получили широкое распространение в специализированной технике, несмотря на то, что представляют существенно более сложную механоэлектрическую систему по сравнению с тензорезистивными и емкостными сенсорами давления [1–3].

Особенности функционирования и конструкции РСД определяют факторы, влияющие на погрешность измерений, среди которых температура имеет ключевое значение. Основными причинами температурной зависимости характеристик РСД являются термические деформации из-за несогласования температурных коэффициентов линейного расширения материалов сенсора и температурная зависимость упругих постоянных.

Уменьшение температурной погрешности достигается путем электронной коррекции характе-

ристик (для чего в РСД вводится сенсор температуры), конструктивными методами, применением разностных схем измерения с использованием нескольких резонаторов [2, 4, 5].

Для повышения надежности работы РСД особый интерес представляет способ, в котором термические деформации в резонансном элементе "самокомпенсированы" в заданном температурном интервале. Такой способ предполагает наличие одного или нескольких пленочных термокомпенсаторов на сенсоре, геометрические размеры и температурные характеристики которых подобраны таким образом, чтобы минимизировать неблагоприятное влияние температуры на характеристики РСД.

В настоящей статье предложена численная модель РСД, которая позволяет эффективно определить влияние термических деформаций на частотные характеристики сенсора. На ее основе рассмотрен конкретный метод компенсации термических деформаций и уменьшения температурной зависимости резонансной частоты РСД.

Численная модель РСД

В качестве модельного объекта рассматривался РСД со стандартной структурой, содержащей плоскую мембрану с размерами $2 \times 2 \times 0,05$ мм и резонансную полость в ее середине, что предпочтительнее краевого расположения [1, 6]. Резонансная полость имеет квадратное основание 600×600 мкм глубиной 5 мкм и сформирована травлением в КОН. Резонирующий элемент — балочка размером $600 \times 50 \times 10$ мкм — жестко прикреплена к краям резонансной полости и возбуждается электростатически. Компенсация термических деформаций в резонансном элементе рассматривалась на стандартной паре материалов — монокристаллический кремний — пленка диоксида кремния SiO₂, которая покрывает всю поверхность кристалла РСД. На планарной поверхности резонансной балочки эта пленка толщиной h_{surf} обеспечивает диэлектрическую изоляцию для тензорезисторов, регистрирующих колебания балочки. Одновременно эта пленка является источником термических деформаций в балочке. На обратной стороне плоской мембраны слой SiO₂ толщиной h_{back} является источником компенсирующих термических деформаций, $h_{surf} \neq h_{back}$. Толщина h_{surf} варьировалась в ходе вычислительного эксперимента в пределах от 0,2 до 1,2 мкм, а толщина h_{back} — от 0 до 2 мкм. Температура окисления в ходе вычислений выбиралась 720 и 1050 °С.

Упругие свойства кристалла кремния описывались полной матрицей упругих коэффициентов [7]. Коэффициент линейного расширения кремния в

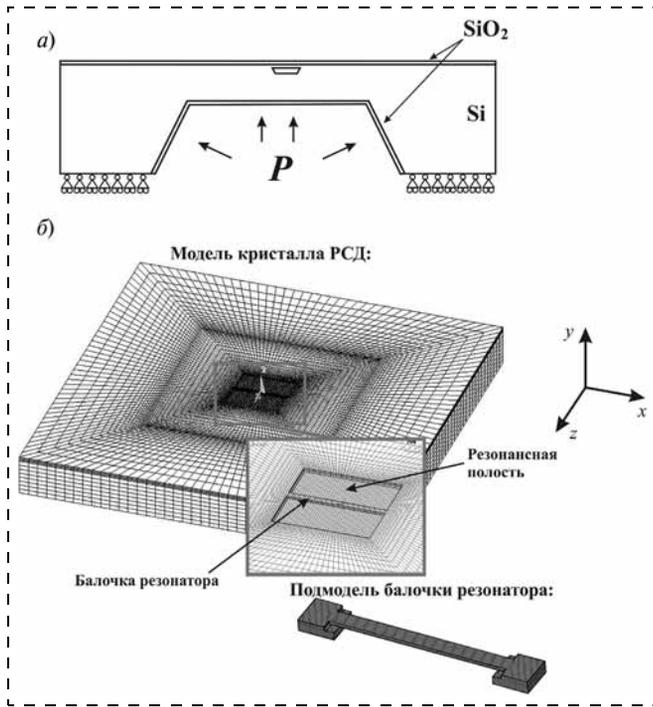


Рис. 1. Структура кристалла РСД (а); конечно-элементная модель кристалла РСД и подмодель балочки резонатора (б)

диапазоне температур от $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1127\text{ }^{\circ}\text{C}$ аппроксимировался формулой [8]

$$\alpha_{\text{Si}}(T) = 4,7 \cdot 10^{-6} - 9,7 \cdot 10^{-7} e^{-\frac{T}{133,9}} - 1,3 \cdot 10^{-6} e^{-\frac{T}{570}}$$

Диоксид кремния был определен как изотропный материал с модулем упругости $E = 70\text{ ГПа}$ и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,17$ и усредненным коэффициентом линейного расширения $\alpha_{\text{SiO}_2} = 0,5 \cdot 10^{-6}\text{ }1/^{\circ}\text{C}$ [9].

Моделирование выполнялось с использованием пакета конечно-элементного моделирования ANSYS (версия 11). Симметрия кристалла позволила ограничиться рассмотрением лишь четверти структуры. Объемная часть структуры РСД была представлена сеткой трехмерных конечных элементов первого порядка SOLID 185. Пленка диоксида кремния была разбита на двумерные конечные элементы первого порядка SHELL181.

Граничные условия выбирались в виде ограничения перемещений в перпендикулярном направлении плоскостей симметрии структуры $x = 0$ и $z = 0$, что позволило ей свободно сжиматься/расширяться в плоскости кристалла РСД. Полное ограничение перемещения в направлении y нижней грани жесткой рамки кристалла исключало ее изгиб. Нагрузка в виде равномерно распределенного давления $P = 0,101\text{ МПа}$ прикладывалась ко всей поверхности подмембранной полости (рис. 1, а).

Размеры балочки резонатора существенно меньше, чем размеры кристалла РСД. Это обуславливает низкое качество расчетной сетки в области резонансной полости в пределах одной модели. Для проведения точного расчета собственных частот балочка и область ее крепления были выделены в подмодель (рис. 1, б).

Численное моделирование выполнялось в два этапа. На первом этапе рассчитывалось деформированное состояние кристалла РСД и подмодели балочки. На втором этапе определялись собственные частоты предварительно деформированной балочки с использованием методики линейного возмущения для корректного учета нелинейных эффектов деформации [6].

Термическая деформация кремния в балочке характеризовались величиной

$$\varepsilon_x = \frac{1}{k} \frac{\sum_{i=1}^k \varepsilon_{xi} V_i}{\sum_{i=1}^k V_i}$$

где суммирование выполнялось по объему кремниевой части балочки, в котором имеется k конечных элементов; ε_{xi} — деформация отдельного конечного элемента; V_i — его объем.

Обсуждение результатов моделирования

Анализ результатов моделирования РСД без окисления обратной стороны мембраны для трех ее толщин (40, 50 и 60 мкм) показывает существенную зависимость средней термической деформации балочки ε_x от толщины пленки SiO_2 и температуры окисления (рис. 2). Увеличение толщины

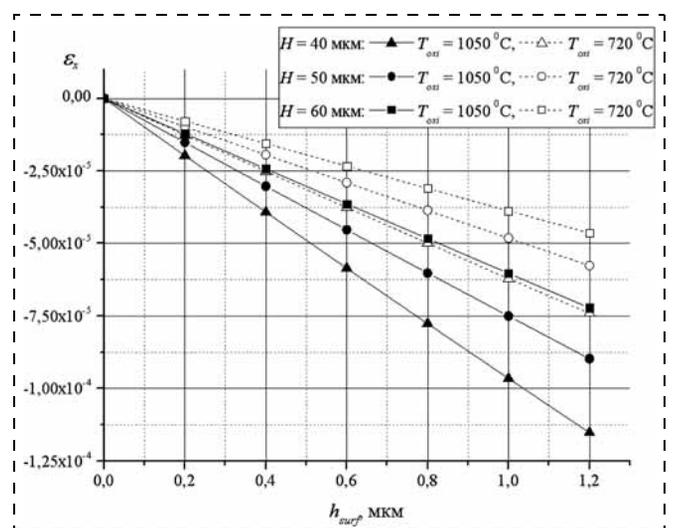


Рис. 2. Зависимость средней деформации балочки резонатора при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ от толщины диоксида кремния на ее поверхности при температурах окисления $T_{\text{oxi}} = 720\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{\text{oxi}} = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ для разных толщин мембраны H

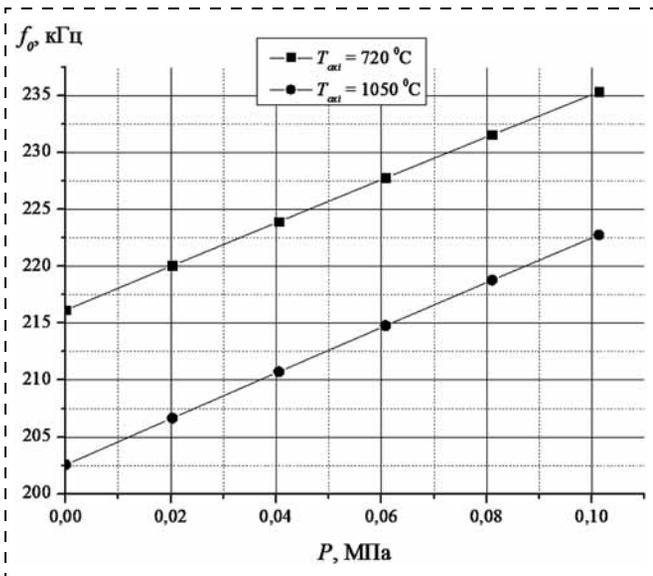


Рис. 3. Преобразовательная характеристика РСД при комнатной температуре для пленки SiO₂ на поверхности балочки $h_{surf} = 1,2$ мкм и температурах окисления $T_{oxi} = 720$ °C и $T_{oxi} = 1050$ °C. Толщина мембраны $H = 50$ мкм

мембраны существенно уменьшает термически индуцированные деформации балочки.

Термически индуцированные деформации $\epsilon_x(T)$ влияют на собственную частоту колебаний балочки в соответствии с формулой [10]

$$f_n = (b_n/2\pi)(E/\rho)^{1/2} \left(h_b/l_b^2 \right) \times [1 + \gamma_n(l_b/h_b)^2(\epsilon_x(T) + \epsilon_{app})]^{1/2}, \quad (1)$$

где n — номер гармоники; b_n и γ_n — расчетные коэффициенты; h_b и l_b — высота и длина балочки; E и ρ — модуль Юнга и плотность материала балочки; $\epsilon_x(T)$ и ϵ_{app} — термическая деформация и деформация от измеряемого давления. Для основной гармоники ($n = 0$) расчетные коэффициенты $b_n = 6,4586$ и $\gamma_n = 0,2949$.

На рис. 3 приведены преобразовательные характеристики РСД, иллюстрирующие влияние термических деформаций при переходе от одной температуры окисления к другой. Для самого неблагоприятного случая ($h_{surf} = 1,2$ мкм) вклад термических де-

формаций $\frac{\Delta f_0|_{\Delta T=1^\circ\text{C}}}{\Delta f_0|_{P=0,101\text{ МПа}}} \cdot 100\%$ составляет 0,09,

0,125 и 0,177 %/°C для толщин мембраны 40, 50 и 60 мкм соответственно. Расчет преобразовательной характеристики РСД выполнялся по методике, описанной в работе [6], с предварительным расчетом термических деформаций. Результаты конечно-элементного моделирования изменения частоты колебаний балочки резонатора от приложенного давления согласуются с формулой (1) в пределах 0,5 %. Частота

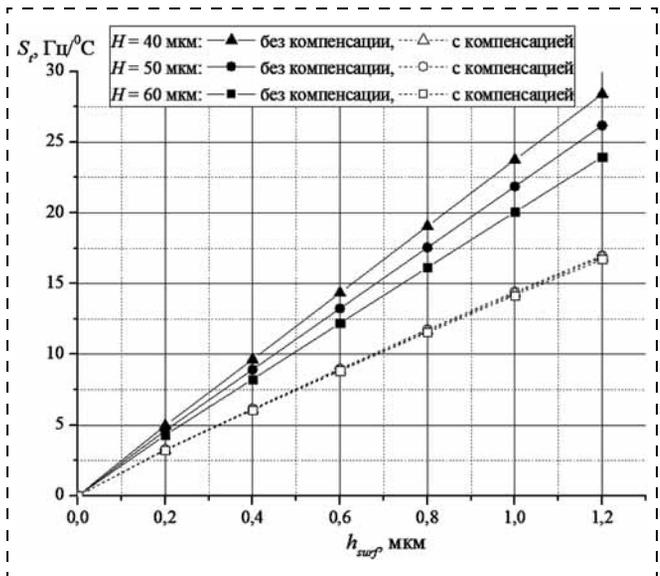


Рис. 4. Зависимость температурной чувствительности сдвига резонансной частоты балочки резонатора от толщины SiO₂ на ее поверхности при температуре окисления $T_{oxi} = 1050$ °C для разных толщин мембраны H . Сплошными линиями отмечен случай без температурной компенсации РСД, пунктирными — с компенсацией

основной гармоники f_0 , определенная численным методом и по формуле (1), при $P = 0$ отличаются на 12,4 %, что объясняется упрощенным характером формулы (1), в которой отсутствуют элементы, учитывающие пленку диоксида кремния в качестве структурной составляющей балочки резонатора.

Температурная чувствительность сдвига резонансной частоты $S_f = \frac{\Delta f_0}{\Delta T}$ была получена из линейной аппроксимации зависимости основной гармоники от температуры в интервале от -60 до 220 °C. Результаты расчетов приведены на рис. 4 сплошными линиями. Из приведенных данных видно, что температурная зависимость сдвига резонансной частоты балочки резонатора возрастает по мере увеличения толщины SiO₂ на поверхности кристалла РСД.

Самым простым способом уменьшения влияния термических деформаций на частотные свойства РСД является минимизация толщины слоя SiO₂, однако технология изготовления накладывает определенные ограничения на его толщину.

В настоящей работе предложен метод компенсации термических деформаций в резонирующем элементе, основанный на минимизации $\epsilon_x(T)$ с помощью термокомпенсатора в виде пленки SiO₂, сформированной на обратной стороне мембраны. Пленка термокомпенсатора создает термические деформации, обратные по знаку деформациям от пленки SiO₂ на поверхности балочки. Главным достоинством этого метода является применение материалов, идеально сочетающихся по технологическому процессу.

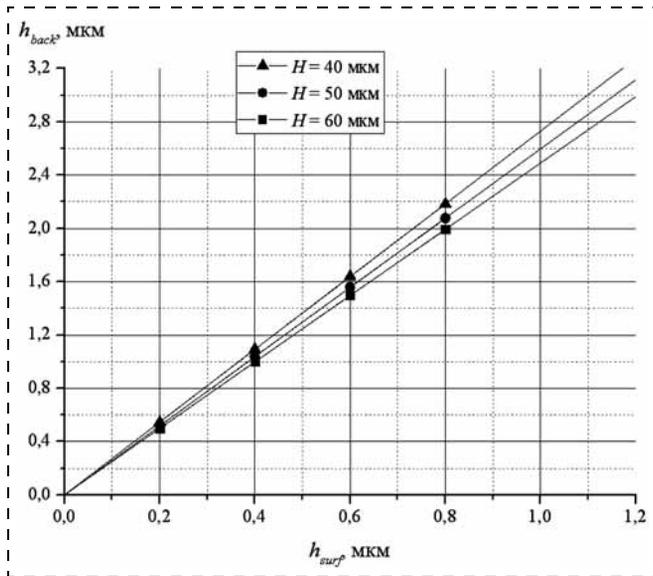


Рис. 5. Соотношение между толщинами оксидной пленки на поверхности балочки и пленки термокомпенсатора, удовлетворяющее условию $\varepsilon_x(T) < 1 \cdot 10^{-7}$ при температурах окисления $T_{oxi} = 720$ °С и $T_{oxi} = 1050$ °С для разных толщин мембраны H

Процесс моделирования был направлен на обнаружение такого соотношения толщин пленок SiO_2 h_{surf} и h_{back} , при котором средняя деформация балочки $\varepsilon_x(T)$ равнялась бы нулю. Реально в вычислениях было задано условие $|\varepsilon_x(T)| < 1 \cdot 10^{-7}$. Результаты численного моделирования, представленные на рис. 5, демонстрируют линейное соотношение между толщинами оксидных пленок с коэффициентом пропорциональности $K = h_{back}/h_{surf} = 2,73, 2,6$ и $2,49$ для мембран с толщинами 40, 50 и 60 мкм соответственно. Существенно то, что при таком соотношении толщин пленок температура окисления не влияет на среднюю термическую деформацию балочки.

Результаты численного эксперимента с применением вышеописанной техники термокомпенсации РСД в интервале температур от -60 °С до 220 °С представлены на рис. 4 пунктирными линиями. Из приведенных данных следует, что температурная чувствительность S_f сдвига резонансной частоты уменьшается, однако это зависит от толщины мембраны и не является полным. Для толщин мембран 40, 50 и 60 мкм уменьшение S_f составляет соответственно 40,5, 35,1 и 30,2 %. Неполная термокомпенсация обусловлена воздействием пленки SiO_2 на поверхности резонирующей балочки, в которой термические деформации сохраняются несмотря на то, что кремниевая часть балочки оказывается разгруженной по термической деформации. В итоге, пленочные термокомпенсато-

ры оказываются более эффективными для РСД, имеющих малую толщину упругого элемента и рассчитанных на измерения небольших давлений.

Заключение

Представленные результаты показывают существенное влияние термических деформаций на интерфейсе SiO_2 — Si колеблющейся балочки РСД на ее частотные характеристики. В рамках предложенной конечно-элементной модели РСД показана возможность значительного уменьшения температурной зависимости резонансной частоты РСД путем создания термокомпенсатора из SiO_2 на обратной стороне мембраны упругого элемента, разгружающего по термическим деформациям кремниевую часть балочки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации НИР "Разработка базовых серийных технологий изделий микроэлектроники: микроэлектронных устройств различных типов (кремниевый резонансный преобразователь давления)" (ГК№ 16.426.11.0041).

Список литературы

1. Petersen K., Pourahmadi F., Brown J. et al. Resonant beam pressure sensor fabricated with silicon fusion bonding // Proc. of Transducers. San Francisco. 1991. P. 664—667.
2. Parsons P., Glendinning A., Anglidis D. Resonant sensors for high accuracy pressure measurement using silicon technology // IEEE AES Magazine. 1992. P. 45—48.
3. Welham C. J., Gardner J. W., Greenwood J. A Laterally Driven Micromachined Resonant Pressure Sensor // The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Stockholm, Sweden, June 25—29. 1995. P. 586—589.
4. Harada K., Ikeda K., Kuwayama H. et al., Various applications of resonant pressure sensor chip based on 3-D micromachining // Sensors and Actuators. 1999. Vol. 73. P. 261—266.
5. Stemme E., Stemme G. A capacitively excited and detected resonant pressure sensor with temperature compensation // Sensors and Actuators A. 1992. Vol. 32. P. 639—647.
6. Гридчин В. А., Чебанов М. А., Васильев В. Ю. Моделирование влияния конструктивно-технологических параметров на характеристики кремниевых резонансных сенсоров давления // Изв. вузов. Сер. "Электроника". 2012. № 2 (92). С. 61—66.
7. Chouaf A., Malhaire Ch., Le Berre M. et al. Stress analysis an singular points of micromachined silicon membranes // Sensors and Actuators. 2000. Vol. 84. P. 109—115.
8. Okada Y., Tokumaru Y. Precise determination of lattice parameter and thermal expansion coefficient of silicon between 300 and 1500 K // J. Appl Phys. 1984. V. 56. N 2. P. 314—320.
9. Gerlach G., Dötzel W. Einführung in die Mikrosystemtechnik, Einführung in die Mikrosystemtechnik — ein Kursbuch für Studierende. YANSER. 2006. 384 p.
10. Burns D. W., Zook J. D., Horning R. D. et al. Sealed-cavity resonant microbeam pressure sensor // Sensors and Actuators. 1995. Vol. A48. N 3. P. 179—186.

УДК 621.382:612.82

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

МОЗГ — ОБЪЕКТ ОРГАНИЧЕСКОЙ ГИБРИДНОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ, ИЛИ ВЗГЛЯД СО СТОРОНЫ. ЧАСТЬ II.

Поступила в редакцию 24.07.2012

Приводится новая интерпретация функционирования мозга — объекта органической гибридной наноэлектроники, созданного Природой. Наиболее близкий аналог искусственной электроники — интегральная схема микро- и наноэлектроники. Проводится сопоставление нейронных цепей мозга и интегральных схем и устанавливаются их основные различия. Показывается, что предложенная интерпретация и ее следствия позволяют не только более глубоко разобраться в принципах функционирования мозга, но и предложить перспективный комплексный подход его дальнейшего исследования, основанный на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами. В части II дается ответ на вопрос: "Как приблизительно функционирует мозг с точки зрения специалиста в области электроники?"

Ключевые слова: мозг, наноэлектроника, электронная интерпретация

Как приблизительно функционирует мозг с точки зрения специалиста в области электроники?

Основная сложность рассмотрения функционирования мозга, особенно различных психических функций, на строгом нейрофизиологическом уровне связана с тем, что при его работе имеет место очень своеобразный "запутанный клубок" большого числа физико-химических процессов, часто взаимосвязанных. Для того чтобы попытаться его "распутать" в соответствии с приведенной интерпретацией, примем следующую гипотезу: будем считать, что доминирующее влияние на функционирование мозга оказывают электрические процессы. Таким образом, считается, что обработка информации в мозге идет в основном на уровне электрических процессов. Что же обеспечивает другой вид принципиально важных процессов? Химические процессы обеспечивают питание электрических цепей мозга, а также их модификацию. Посмотрим, что из этого получится.

Прежде чем отвечать на поставленный вопрос кратко охарактеризуем состояние проблемы согласно данным специальных дисциплин о мозге. В настоящее время явно выделяются два уровня описания работы мозга, а именно: нейрофизиологический и нейропсихологический.

Очень краткое и емкое резюме по поводу работы мозга и нервной системы в целом на нейрофизиологическом уровне дано в прекрасном учебнике [1]: "Нервная система человека состоит из миллиардов отдельных клеток, называемых *нейронами*. Нейрон получает сигналы от других нейронов через ответвления дендритов и клетку, объединяет эти сигналы в клетке и передает электрический импульс (потенциал действия) по аксону. Когда эти сигналы достигают концевых волокон аксона, они стимулируют выход химических посланников, называемых *нейротрансмиттерами* или *медиаторами*. Эти молекулы передают свои возбуждающие или тормозящие импульсы, когда пересекают синаптический промежуток между нейронами и попадают на рецепторные участки соседних нейронов."

Отметим два важных для нас в дальнейшем момента. Во-первых, согласно данным нейрофизиологии обработка информации в мозге, а также различные психические функции связываются с работой нейронных ансамблей. Предоставим слово блестящему советскому и российскому нейрофизиологу академику Наталье Петровне Бехтеревой и ее коллегам [2]: "Предположение о том, что сложные функции мозга реализуются не отдельными нервными клетками, а их системами, возникло давно. Так, еще в 1949 г. Хебб (*Hebb*, 1949) определил нейронный ансамбль как гипотетическое объединение нейронов, формирующееся в процессе обучения и выполняющее определенную функцию. Экспериментальные доказательства существования таких систем функционально объединенных нервных клеток, общие принципы их организации были представлены позднее в ряде работ (*Mountcastle*, 1957; *Hubel*, *Wiesel*, 1968; Коган, 1979 и др.)." Мы будем придерживаться этой ставшей канонической для нейрофизиологии точки зрения. Необходимо сразу же отметить большое число названий для таких разнообразных форм объединений (ассоциаций) нейронов в литературе. Приведем лишь некоторые [3]: нервные сети и сеточки, ансамбли и микроансамбли нейронов, нейронные модули, нейронные колонки, нейроценозы, популяции нейронов, функциональные модули, бочонки, микросистемы. В данной работе в дальнейшем

для таких объединений будет использоваться (за исключением цитат) термин "нейронная цепь" [4], как наиболее полно отвечающий ее цели.

Во-вторых, приведенное выше описание (резюме), строго говоря, дано для случая соединений между нервными клетками в виде синапсов с химической передачей (первый тип). Необходимо отметить, что в мозге также имеются синапсы с электрической передачей (второй тип), а также химической и электрической передачей, т. е. смешанного (третьего) типа. Однако сразу же заметим, что синапсов первого типа в мозге большинство [5, 6].

Наиболее кратко и в то же время емко работа мозга на нейропсихологическом уровне описана в другом блестящем учебнике [7]: "...мозг представляет собой сложную единую метасистему, состоящую из различных макросистем (проекционных, ассоциативных, интегративно-пусковых, лимбико-ретикулярных), каждая из которых строится из различных микросистем (микроансамблей). Интегративная деятельность систем разных уровней обеспечивается их иерархической зависимостью и горизонтально-горизонтальными... и вертикально-горизонтальными... взаимодействиями. Динамичность мозговых структур, их индивидуальная изменчивость достигается за счет динамичности и изменчивости составляющих их микросистем. Качества динамичности и изменчивости присущи разным системам в разной степени."

И в то же время оценка нашего сегодняшнего понимания работы мозга при реализации сложных психических функций, включая мышление, хорошо и точно охарактеризована в книге [8]: "Обобщение рабочих принципов более или менее изученных систем может действительно привести и к пониманию более сложных процессов, близких к мышлению, но все это еще далеко не ясно".

Резюмируя сказанное, отметим следующее. Данные нейрофизиологии свидетельствуют о том, что наиболее важными для его работы являются электрические и химические процессы [5, 8–10]. Более того, важность для понимания психических функций мозга электрических процессов отмечалась многими авторами [2, 4, 11–14]. И, тем не менее, традиционно в специальных дисциплинах о мозге предпочтение отдается химическим сигналам, а не электрическим. Этот канонический взгляд выражает следующая фраза [15]: "Фундаментальным можно считать тот факт, что мозг представляет собой не столько электрическую, сколько химическую сеть взаимосвязей. В самих нейронах информация передается посредством электрических импульсов, но между нейронами — с помощью химических веществ".

Почему же так получилось? Так как этот вопрос имеет принципиальное для нас значение, на него необходимо ответить. Считается, что именно опыты известного психолога К. Лэшли нанесли "смер-

тельный удар по теории электрических цепей" [12], так как посчиталось достаточным, что нейронные цепи имеют разрывы (щели) в виде синаптических соединений (химический синапс). Своеобразный вердикт стал безжалостным и сейчас кратко может быть образно выражен фразой [5]: "... идея живого электричества имела столь сильное влияние, что прошло более 100 лет, прежде чем были получены доказательства, опровергающие предположение об электрической природе передачи возбуждения с нерва на мышцу, а также между нервными клетками". Итак, "камнем преткновения" стал химический синапс.

Попытаемся, однако, разъяснить принципы работы мозга с использованием принятой нами гипотезы.

Прежде всего покажем, что *все элементы нейронных цепей мозга могут рассматриваться (интерпретироваться) в качестве элементов электрических цепей*.

Очень точная характеристика нейрона в целом дана Дж. фон Нейманом [16]: "...импульс представляет собой вырожденное состояние сложного электрохимического комплекса, каковым является нейрон, который — если провести полный анализ его функционирования — следует рассматривать как моделирующую машину". Хотя в настоящее время существует огромное число упрощенных моделей нейронов (см., например, [18, 19]), другая, более простая по сравнению с отмеченной и известная в литературе "электронная" интерпретация будет достаточна для нас на данном этапе, а именно: нейрон в целом является суммирующим генератором импульсов, работающим по принципу "все или ничего". Нервные волокна (отростки), т. е. аксон, дендриты, шипики, входящие в нейрон, также могут интерпретироваться в качестве электрических элементов. Так, в настоящее время уже создана достаточно адекватная кабельная теория пассивной передачи электрического импульса вдоль аксона и дендритов, причем наиболее точные результаты получаются с помощью метода, когда нервное волокно разбивается на ячейки (*compartments*) [17]. В то же время для описания возникновения (генерации) потенциала действия в ответ на возбуждение необходимо обязательно учесть влияние ионных каналов, в частности их селективной проницаемости, и потенциал-индуцированных конформационных изменений белков. Традиционно этот процесс описывается в биофизике с помощью феноменологических уравнений Ходжкина—Хаксли [17, 20]. К сожалению, "эти уравнения не выведены на основе физических принципов, а получены эмпирически" [17]. Здесь уместно отметить, что такой вывод будет сделать крайне непросто, так как только ионные каналы являются достаточно сложными наноэлектромеханическими системами. Общее же число разнообразных каналов даже в одном нейроне может быть очень большим [9]. И тем не менее отмеченные

теории позволяют объяснить возникновение (генерацию) и распространение потенциала действия, т. е. электрического сигнала, в нейроне [5].

"Камнем преткновения", как уже отмечалось, стал химический синапс, имеющий принципиально важное значение для нейронных цепей, обеспечивая контакты между нейронами цепи. Итак, что же происходит в химическом синапсе согласно данным нейрофизиологии? "Нервный импульс приходит к окончанию аксона и вызывает здесь высвобождение специальных нейромедиаторных молекул. Эти нейромедиаторы воздействуют на постсинаптическую мембрану так, что либо понижают ее мембранный потенциал, либо предотвращают его понижение. При понижении мембранного потенциала частота импульсации возрастает; мы назовем такой синапс *возбуждающим*. Если же мембранный потенциал вместо этого стабилизируется на подпороговом уровне, импульсы не возникают или возникают с меньшей частотой, и тогда синапс называют *тормозным*" [9]. Что же мы имеем с точки зрения электроники? Возбуждающий и тормозный химический синапсы — это преобразователи частоты импульсов. В случае же тормозного синапса в режиме, когда импульсы не возникают вообще, мы имеем просто выключатель. Таким образом, и химический синапс¹ является элементом электрической цепи! В связи с этим уместно заметить, что обычная электрическая батарейка, в которой тоже принципиально важны химические процессы, считается объектом электроники. И ни у кого это не вызывает даже тени сомнения.

В результате, *нейронная цепь мозга может интерпретироваться как нелинейная электрическая цепь!* Наиболее близкий искусственный аналог — интегральная схема.

Рассмотрим в чем заключаются основные отличия нейронных цепей (первый тип) мозга в такой интерпретации от современных ИС микро- и наноэлектроники (второй тип).

Во-первых, нейронные цепи основаны на органических материалах, а ИС — на неорганических материалах. Во-вторых, функционирование первых определяется ионной проводимостью, а ИС — электронной (и дырочной) проводимостью. Эти два фактора в целом и приводят к более медленному функционированию электрических цепей первого типа по сравнению с цепями второго типа. Казалось бы плохо. Однако такое более медленное поведение имеет, как будет показано, принципиальное значение и связано, прежде всего, с необходимостью взаимодействия (преобразования) электрических и

¹ Отметим, что электронная интерпретация других типов синапсов не вызывает затруднений. Так, электрический синапс — нелинейная емкость с утечкой или "электрический выпрямитель" [6]. Смешанный синапс может интерпретироваться как сочетание синапсов двух других типов. В целом, возможны и иные представления этих нелинейных элементов нейронных цепей (см. далее).

химических процессов в мозге. Для этого, а также для того, чтобы проанализировать третье важное отличие, необходимо привлечь современные данные нейрофизиологии о том, как формируются нейронные цепи (см., например, [1, 5, 8]).

"В общем виде можно сказать, что все части мозга в своем развитии проходят восемь главных стадий. (1) Клетки нервной пластинки детерминируются как будущие нейроны того или иного общего типа. Предполагают, что клетки мезодермы, лежащие под нервной пластинкой, выделяют какие-то сигнальные вещества, которые и воздействуют на растущие из эпендимы клетки каким-то еще неизвестным образом. (2) Клетки детерминированного участка начинают делиться. (3) Эти клетки мигрируют к местам их промежуточного или окончательного назначения. (4) Достигнув места своей окончательной локализации, все еще незрелые нейроны начинают собираться в группы, из которых позже разовьются "ядра" взрослой нервной системы. (5) Эмбриональные нейроны, образующие скопления, перестают делиться и начинают формировать соединительные отростки. (6) Это приводит к раннему образованию связей и обеспечивает возможность синтеза и выделения нейромедиаторов. (7) В конце концов "правильные" связи стабилизируются, а клетки, связи которых оказались "неудачными" или слишком малочисленными, отмирают. Этот процесс известен как "запрограммированная гибель клеток". (8) После того как общее число нейронов стабилизировалось, происходят незначительные изменения проводящих путей в соответствии с функциональной нагрузкой тех или иных систем" [8].

Итак, что наиболее важно для нас? Это констатация двух важнейших свойств нейронной цепи, а именно: она сначала растет, а впоследствии модифицируется. Таким образом, *нейронная цепь — это сначала растущая, а затем, модифицируемая электрическая цепь!* И в этом, пожалуй, самое главное и важное ее отличие (своеобразие) от ИС, которое и приводит к наиболее существенным преимуществам цепей первого типа над цепями второго. Что особенно восхищает в работе мозга, так это то, что общее число нейронов с возрастом уменьшается², а при этом количество зафиксированной информации, как правило, растет³. Казалось бы парадокс! Что же в действительности происходит?

Опишем как работает мозг при фиксации и обработке информации в рамках предложенной интерпретации, используя при этом данные нейрофизиологии. Для простоты рассматриваем стадию модификации нейронной цепи.

² Согласно современным данным относительно небольшое число новых нейронов при этом, судя по всему, может появляться [21].

³ Имеется в виду, конечно же, нормально функционирующий мозг.

Как уже отмечалось, после получения информации сенсорными рецепторами организма стимул соответствующей модальности *конвертируется* в электрический сигнал. При этом происходят преобразования, декомпозиция (расщепление, разделение) первичной информации в различных системах для последующего воссоединения на уровне обработки электрических сигналов нейронной цепью. Как же модифицируется сама цепь?

После возбуждения и прохождения электрического сигнала в нейронной цепи внутри нее (ее структурных элементов) запускаются сложные каскады биохимических реакций (ДНК → РНК → протеины и другие молекулярные структуры), которые создают основу в результате доставки по нервным волокнам (аксоны, дендриты) необходимых веществ и модификации в соответствующих местах топологии электрической цепи. Используя язык анатомии, происходят регулярные морфологические изменения нейронной цепи. Если информацию необходимо зафиксировать на более длительный срок, то идет реверберация (повторный прогон) электрических сигналов по нейронной цепи для поддержания биохимических реакций. Причем ввиду экономичности и рациональности Природы *идет добавление информации к уже имеющейся, т. е. постоянная модификация* (возможно крайне незначительная в целях экономии) *кодирующей информацию цепи*. Так как входящая информация, как правило, характеризуется различными модальностями, то, хотя бы по этой причине, информация кодируется в различных областях мозга (нейронных цепей).

Казалось бы в этом случае Природа расточительна. Однако нет и тут она — гениальна. Во-первых, ввиду декомпозиции информации рациональнее подобную, хотя бы по модальности, информацию хранить в одной и той же области (рядом), так как модификаций нейронной цепи будет меньше. Необходимо также помнить, что мозг работает в определенных ограничениях (число нейронов уменьшается, объем мозга не возрастает, информация полностью не стирается, а, по-существу, "наслаивается"). Во-вторых, и может быть это даже более важно, благодаря этому достигается надежность в работе мозга, т. е. происходит определенное дублирование информации в различных участках мозга, что хорошо известно из нейрофизиологии и нейропсихологии [7, 12, 22, 23]. В-третьих, и что самое интересное, эффективность обработки информации не падает, а возрастает вследствие параллелизма (см. далее). При этом следует учитывать, что информация хранится в сжатом (закодированном виде), а следовательно, не полна. Такая организация памяти оказывается в целом, несмотря на кажущуюся парадоксальность, при указанных ограничениях и достаточно экономичной.

Итак, мы приходим к еще одному важному отличию нейронных цепей от ИС. *Нейронные цепи мозга характеризуются крайне сложной (фактически индивидуальной) топологией*. Так, строго говоря, нет топологически одинаковых нейронов, включая тела клеток, аксоны, дендриты, шипики и др., и соединений — синапсов, хотя все эти элементы нейронной цепи и имеют определенные типы. И в принципе, у каждого человека хранящаяся информация прежде всего кодируется именно в топологии нейронной цепи.

О важности топологии, в частности, свидетельствуют следующие данные для достаточно простого (элементарного) случая. В работе [17] приведены результаты моделирования при исследовании влияния всего лишь расширения аксона на поведение потенциала действия. Оказалось, что "в зависимости от диаметра расширения аксона потенциал действия может либо задерживаться, либо рефлектировать, либо прекращаться" [17], т. е. его поведение может меняться качественно. Следовательно, даже если рассматривать мозг в первом приближении (см. далее) как набор нейронных цепей (или просто нейронную цепь), то у каждого человека этот набор индивидуальный. И в этом потрясающая изобретательность Природы. К сожалению, для современных ИС характерна именно регулярная топология.

Что же определяет индивидуальность нейронной цепи? "Большинство исследователей считает, что структурной основой памяти является нейронная реорганизация на базе стабильной синапсо-модификации" [24], т. е. фактически связывается с контактными системами между нейронами (синапсами) электрической цепи первого типа. Хотя и существуют отличные точки зрения (см., например [25]), она стала доминирующей в специальных дисциплинах о мозге [1]. Здесь лишь отметим мнение известного американского исследователя Дж. Эделмена о кандидатах на память, а именно [26]: "... новые дендритные связи, метастабильные изменения мембраны и поверхности клетки на дендритных шипиках, молекулярные изменения синапсов".

В то же время анализ современных данных нейрофизиологии показывает, что изменений, влияющих на нейронную цепь в процессе ее функционирования, может быть много, т. е. гораздо больше. Укажу лишь некоторые: 1) изменения в количестве медиатора, выделяемого в синапсах; 2) изменение содержания ионов в нейронах, что влияет на активность клеток; 3) изменение проводимости ионных каналов вследствие изменения свойств белков; 4) изменение числа ионных каналов проводимости; 5) синтез РНК, белков, приводящих к структурным изменениям в синапсах, шипиках, дендритах, аксонах, изменениям в ядре клетки и др. Возможна и организация

новых связей¹ между нейронами. Так что факторов, влияющих на индивидуальность нейронной цепи — много. И это не только топология цепи, т. е. все может быть гораздо сложнее, чем важность только синапсов, как считают многие нейрофизиологи. Каждый "букет" из отмеченного набора, по-видимому, и определяет вид памяти. Поэтому деление на мгновенную, кратковременную и долговременную память [7] является весьма условным². Замечу также, что многие авторы выделяют и другие виды памяти (см., например, работы [1, 25, 27, 28]), в том числе в рамках указанных. Правильнее, по-видимому, говорить о разных фазах запоминания (записи информации), связанных с возможными разнообразными изменениями в нейронной цепи. Если информация важна, то она закрепляется в нейронной цепи, например, вследствие реверберации электрического сигнала (см. выше). Если она не важна, то просто не закрепляется, т. е. соответствующих изменений в нейронной цепи не происходит. При этом, по-видимому, и то и другое возможно в различных участках мозга, причем отличающиеся виды памяти не обязательно разделены в пространстве, т. е. могут быть разделены во времени.

Итак, нелинейная электрическая цепь первого типа характеризуется не только крайне сложной топологией, но и вариацией свойств составляющих ее казалось бы однотипных элементов (тела клеток, аксоны, дендриты, шипики, синапсы и др.). В современных ИС как раз стремятся наоборот уменьшить подобные девиации. Таким образом, с возрастом (после определенного этапа, см. ранее) происходят усложнения нейронных цепей не за счет увеличения числа нейронов, а за счет увеличения связей и других модификаций этих электрических цепей. В процессе модификации или перестройки электрических цепей первого типа (фиксации следов) важными факторами являются изменения связей, геометрии, проводимости, диэлектрической проницаемости и т. п. (в микроэлектронике это называется конструктивно-технологическими и электрофизическими параметрами) соответствующих участков цепей, что достигается с помощью разнообразных биохимических процессов. И здесь, по-видимому, нет или мало чего незначительного, так как фактически все основные составляющие нейронной цепи (тело клетки, аксон, дендриты, шипики, синапсы, ионные каналы и т. п.) являются нелинейными элементами электрической цепи (напомним, что даже аксон³ при пассивной передаче электрического сигнала целесообразно моделировать с ис-

пользованием метода ячеек), свойства которых, как указывалось, могут зависеть от многих факторов. Следовательно, *химические реакции важны не только в качестве питания (источника энергии) электрических цепей первого типа, но и для их модификации!* Именно поэтому, в первую очередь, Природа не пошла по чисто "электронному пути", а пошла по "гибридному пути", т. е. элегантно взаимодействия электрических и химических процессов. Кроме того, отмечу и еще две причины. Вследствие приема разнообразной информации (зрительной, слуховой, вкусовой и т. п.) необходимо ее преобразование в электрические сигналы. Необходимо также согласование, как правило⁴, с более медленными по сравнению с электрическими, другими (в том числе химическими) процессами в организме и внешней среде.

Все ли цепи при этом модифицируются? Конечно же нет. Прежде всего, нейронные цепи, ответственные за жизненно важные функции организма, а также хранящие в длительной памяти информацию на всю жизнь, не должны подвергаться ощутимым модификациям. Модификация некоторых из них может привести просто к трагическим последствиям. В то же время нейронные цепи, используемые при обработке сенсорной информации, в мыслительной деятельности и находящиеся в основном в коре головного мозга, могут и должны обладать возможностью такой модификации, хотя бы ввиду огромного разнообразия окружающего нас мира и вследствие отмеченных ранее ограничений. Этот взгляд очень хорошо согласуется с концепцией Н. П. Бехтеревой "о существовании жестких и гибких звеньев различного функционального значения в нейрофизиологических системах обеспечения психической деятельности" [2]. Под "жесткими и гибкими звеньями" здесь понимаются "популяции нейронов". Необходимо, однако, заметить, что "гибкие звенья" могут реализовываться не обязательно за счет модификации нейронных цепей, но и за счет многообразных возможностей в поведении самих нелинейных электрических цепей первого типа (см. далее).

Таким образом, *с точки зрения электроники, мозг зрелого человека — это, прежде всего⁵, набор нелинейных электрических (нейронных) цепей двух видов, которые не должны модифицироваться и которые могут модифицироваться.* Близкими аналогами в микроэлектронике (см., например, [30]) являются ИС памяти, а именно постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) и программируемые ПЗУ, соответственно. *Итак, память.* В связи с этим опять уместно вспом-

¹ Замечу, что может происходить и обратный процесс, т. е. "увядание" некоторых старых связей, хотя бы вследствие гибели нейронов, а также процессов забывания, старения. Могут происходить подобные изменения и в других старых модификациях.

² Недаром в работе [27] они названы "гипотетическими компонентами памяти".

³ Согласно современным данным аксоны могут стимулировать эффекты "памяти" [21] в нейронах.

⁴ Исключение из отмеченных ранее очевидно составляют оптические сигналы.

⁵ Не следует, конечно же, забывать о других составляющих мозга, а именно [29]: кровеносной системе, нейроглиальных клетках, которых больше, чем нейронов, и т. п., обеспечивающих важные вспомогательные функции (доставка требуемых веществ, питание и др.). Здесь мозг рассматривается как устройство хранения и обработки информации, мыслительной деятельности.

нить слова великого физиолога Ивана Михайловича Сеченова: "Память — сила, которая лежит в основе всего психического развития. Не будь в самом деле этой силы ... психическое развитие было бы невозможно" [31]. Сразу же замечу, что и многие другие исследователи мозга отмечают большую важность для его работы памяти (см., например, [23, 25, 32]), однако никто не рассматривал ее в рамках предложенной последовательной электронной интерпретации. Как свидетельствуют результаты современных экспериментальных исследований, три структуры мозга играют ключевую роль для памяти [27]: кора, мозжечок и гиппокамп, "хотя следует подчеркнуть, что функции памяти распределены по всему мозгу".

После этого мы готовы к рассмотрению того, как приблизительно функционирует мозг. Так как мозг является полифункциональным устройством, опишем принципы его работы в некоторых различающихся режимах. Прежде всего, это связано с тем, что многие процессы происходят одновременно или параллельно, например, обработка поступающей информации, воспоминания, мышление, управление различными системами организма, причем некоторые осознанно (с участием определенных структур мозга, по-видимому гиппокампа [1]), а другие — нет (без их участия). Множество режимов работы свойственно и для различных систем мозга, а точнее формирующих их нейронных цепей. Более того, полифункциональностью характеризуются не только нейронные популяции, но и сами нейроны [2]. В этом, с одной стороны, огромная сложность анализа, а с другой стороны, — впечатляющая гибкость в работе мозга.

Можно условно выделить три типа режима работы мозга как набора нелинейных электрических цепей, а именно: 1) при внешнем воздействии; 2) без внешнего воздействия (внутренний); 3) смешанный. При этом все отдельные режимы работы мозга, включая восприятие, воспоминание, мышление и другие психические функции, относятся к одному из указанных типов. Более того, любой специфический режим работы мозга является результатом прохождения электрического сигнала (сигналов) по соответствующему набору электрических цепей, причем основными возможными операциями являются: сравнение, кодирование, декодирование, команда к действию, модификация нейронных цепей.

К первому типу режимов относится обработка сенсорной информации. Уже отмечалось, что после получения информации сенсорными рецепторами она конвертируется в электрические сигналы с различными *преобразованиями*¹ (декомпозиция и т. п.), т. е. происходит *кодирование* сигнала в ре-

¹ Этот термин достаточно общий и его можно использовать для описания почти всего, что происходит в мозге с электрическими сигналами. Поэтому ранее выделены и далее употребляются более конкретные понятия.

зультате его иерархической обработки. Далее происходит прохождение электрического сигнала по нейронным цепям памяти в различных участках мозга (в основном в коре головного мозга). Ввиду нелинейности цепей и их такого диффузионного расположения, в мозге возможна как дивергенция, так и конвергенция в распространении электрического сигнала. В конечном итоге поиск осуществляется в результате операции *сравнения* поступившего кодированного электрического сигнала с информацией, закодированной цепями. В случае совпадения с определенной степенью точности происходит как бы резонанс, и объект опознан. А если нет? Или нет требуемого совпадения? В этом случае принимается *команда к действию*, в частности здесь², о необходимости *модификации нейронных цепей* в соответствующих участках, т. е. новое дополнительное кодирование в цепях. Замечу, что отличие может быть мало существенным, так как совпадают наиболее важные признаки. И в этом случае объект также опознан, но может быть все же дана команда на модификацию цепей. В результате такой иерархически-диффузной обработки электрического (внешнего) сигнала в мозге и реализуется массовый параллелизм при обработке поступающей сенсорной информации, например при распознавании образов. Так как электрические сигналы распространяются достаточно быстро, то сама процедура параллелизма в обработке информации характеризуется очень высокой эффективностью. Последнее отмечалось многими исследователями мозга.

Ко второму типу режимов работы мозга относятся воспоминания. Согласно принятой интерпретации это прохождение электрического сигнала, инициированного самим мозгом (поэтому внутренний режим), по соответствующим (определенным в пространстве и во времени) цепям памяти, в которых зафиксированы данные события, т. е. происходит *декодирование* (внутреннего) сигнала. Тут уместно напомнить, что искусственным электрическим раздражением мозга (определенных участков) можно вызвать не только воспоминания, но и другие психические реакции (см. ранее), что удавалось получить многим исследователям даже с использованием достаточно грубой электродной техники (см. далее).

Подобное воспоминаниям происходит и при мышлении, однако, как правило, с не столь жесткими связями, как в первом случае для строго определенных событий. Поэтому многие акты мыслительной деятельности могут быть также отнесены ко второму типу режимов работы мозга, т. е. внутреннему. Природа и здесь продемонстрировала свою гениальность, так как и эта деятельность характеризуется очень высокой эффективностью и экономичностью. Итак, *мысль — это декодирование*

² Команда к действию может быть подана и после опознания объекта, например, к движению и т. п.

(внутреннее воспроизведение) электрического сигнала (сигналов), инициированного самим мозгом и проходящего по различным нейронным цепям мозга соответствующей пространственно-временной конфигурации. Следовательно, мысль — это своеобразный обратный процесс по отношению к обработке поступающей информации (прямой процесс), который инициируется, по-видимому, в основном корой головного мозга, т. е. по нейронным цепям проходят токи и возникают образы, понятия и т. п. в результате декодирования информации, содержащейся в соответствующих нейронных цепях. А это означает, что мы в основном мыслим "шаблонами", закодированными в имеющихся электрических цепях первого типа. И в этом огромная эффективность и экономичность работы мозга. Прохождение электрического (достаточно быстродействующего¹) сигнала может происходить как бы "скачками" между различными цепями, т. е. не столь организованным (иногда достаточно хаотическим) образом, как при воспоминаниях. Потрясающее многообразие мыслительной деятельности даже в этом случае может реализовываться вследствие колоссального числа таких цепей.

Почему же именно мыслительная деятельность вызывает так много дискуссий и споров в литературе? Кроме целесообразности использования приведенной электронной интерпретации в работе мозга, автор также видит несколько объективных причин. Во-первых, внутреннее воспроизведение при мыслительной деятельности происходит закодированной информацией, т. е., строго говоря, лишь компактно отражающей полученную ранее более полную информацию о действительности и преобразованную. Во-вторых, необходимо учитывать отмеченное ранее постоянное "наслоение" информации. В результате создается иллюзия чего-то необычного, таинственного, непостижимого.

Очень интересным остается вопрос о возможности модификации нейронных цепей в процессе мыслительной деятельности. Если отрицать такую возможность, то мы мыслим только "шаблонами" или "стереотипами". Это, кстати, согласуется с информацией многих исследователей мозга о том, что он часто додумывает или подгоняет свое решение, видение под уже имеющееся² (см., например, [1, 15, 27, 33]). Хочется, однако, верить, что в процессе творческой работы, хотя бы в некоторых случаях, может происходить определенная модификация (не обязательно возникновение новых связей, см. ранее) цепей, как при реальном внешнем воздействии, научении³. Здесь уместно также отметить большие

¹ В этом плане важна информация Н. П. Бехтеревой и ее коллег о соизмеримости по порядку величин длительности импульсной активности нейронов с временными характеристиками мыслительной деятельности [2].

² По-видимому, это более типично для пожилых людей, так как возможности модификаций с возрастом ухудшаются.

возможности в работе и самих нелинейных электрических цепей первого типа без модификации, например, при подаче различных входных сигналов на нейронные цепи.

В то же время из психологии известно, что творческий процесс может быть представлен в виде четырех этапов [27]: 1) подготовка; 2) инкубация; 3) инсайт (просветление); 4) проверка. Вполне возможно, что в период инкубации как раз и происходит модификация нейронных цепей или перебор по ним, хотя последний, по крайней мере, в ряде случаев, более быстрый процесс. Когда формируется необходимый набор нейронных цепей, который отражает решение изучаемой проблемы, и происходит инсайт (озарение) в результате прохождения по нему электрического сигнала.

Таким образом, обычно мышление — это внутреннее восприятие человеком закодированной в самом же мозге информации.

Важный смешанный режим работы мозга — управление различными системами жизнедеятельности организма с помощью цепей фиксированного вида при поступлении внешней информации. Так как многие рассмотренные режимы могут реализовываться параллельно, то, строго говоря, типичный режим функционирования мозга — смешанный⁴. Например, мыслительная деятельность часто происходит при поступлении внешней информации, т. е. в смешанном режиме. Ясно, что в этом случае модификация нейронных цепей возможна. Отмечу также взаимодействие или взаимовлияние различных специфических режимов работы мозга.

Необходимо подчеркнуть, что нормально функционирующий развитый мозг, в котором происходят соответствующие процессы консолидации на основе электрических и химических процессов, — необходимое, но не достаточное условие для наличия сознания. Как пишут многие исследователи, необходимо также обязательное взаимодействие с внешней средой (см., например, [1, 7, 8, 13]), т. е. прохождение нормального цикла развития в результате этого взаимодействия. Узловые моменты такого взаимодействия были кратко описаны в рамках электронной интерпретации работы мозга.

Здесь уместно рассмотреть вопрос о сложности набора нейронных цепей мозга. Прежде всего, впечатляют цифры [5, 9, 10, 34]: число нервных клеток $10^{10} \dots 10^{12}$; число синапсов $10^{14} \dots 10^{15}$; еще большее число ионных каналов и молекул⁵, являющихся ключевыми структурами. Более того, согласно современным данным число различных типов нервных клеток "несомненно, больше сотни, а может

³ Интересно заметить, что в творческом процессе многое выглядит именно как своеобразное самонаучение, т. е. как бы часто без внешнего воздействия.

⁴ В этом плане внутренний режим работы мозга — удобная идеализация (см. также далее).

⁵ Около 10^{22} на 1 см^3 [35].

быть, и больше тысячи" [9]; весьма разнообразными могут быть и ионные каналы [5]. Морфологические данные [36] свидетельствуют, что и синапсы даже одного типа достаточно сильно различаются. Возможно и огромное число связей нейрона с другими нейронами, в частности, от 1 до 10 тысяч синаптических связей и более [15]. Сюда же следует добавить отмеченные ранее многочисленные индивидуальные особенности нейронных цепей. Так, данные электрофизиологии [37] свидетельствуют, что даже аксоны и дендриты не могут быть отнесены к простым пассивным элементам электрической цепи, потому что идет регенерация потенциала действия, возникновение спайков и т. п.

Таким образом, строго говоря, почти нет одинаковых элементов, составляющих нейронные цепи. Исключением, по-видимому, являются лишь однотипные ионные каналы, формируемые соответствующими молекулярными структурами (см. ранее).

В результате, сложность набора этих своеобразных электрических цепей первого типа просто потрясает¹. В связи с этим не случайны огромные потенциальные возможности мозга в запоминании информации. Так, старые оценки объемов памяти в 10^{15} – 10^{16} бит [12] были, по-видимому, излишне оптимистическими по сравнению с современными — 10^9 – 10^{12} бит [1]. И тем не менее возможности, конечно же, впечатляют.

Результатом всего этого является большое разнообразие в поведении нелинейных электрических цепей первого типа. Во-первых, уже отмечалось, что они характеризуются динамическими режимами работы. Так, рядом специалистов подчеркивается разнообразие нервных кодов мозга и передачи сообщений в импульсной форме [2, 18, 38]. Во-вторых, многие виды психической, в частности мыслительной деятельности, связываются с функционированием большого числа (набора) нейронных ансамблей (цепей). По оценкам Н. П. Бехтеревой и ее коллег, "число таких звеньев², по-видимому, никак не меньше тысячи или скорее десятков тысяч зон" [2]. Поэтому важны могут быть "коллаптивные" или "кооперативные эффекты" [2]. С ними, в частности, можно связать и известную "голографическую теорию" функционирования мозга [38]. Интересно заметить, что подобные коллаптивные эффекты бывают важны и в сложных ультрабольших ИС (УБИС) (см., например, [39]), т. е. в электрических цепях второго типа. В результате, например, при распознавании образов действие нейронных цепей часто носит как бы резонансный характер (см. ранее). Простейшим примером является функционирование клеток полосатой коры при обработке оптических сигналов.

¹ Поэтому, как мне кажется, вполне понятен достаточно сложный вопрос о доступности информации [1].

² Имеется ввиду "жестких и гибких звеньев мозговых систем" [2].

Они как раз наиболее сильно и реагируют на определенный стимул [5].

В этом плане интерес представляют результаты моделирования простейших нейронных сетей³ монографии [19]. Оказалось, что для одной сети возможно огромное многообразие в поведении даже в установившихся колебательных состояниях, причем для этого не обязательна модификация синаптических связей. Так что даже одна сеть без модификации может хранить огромное число образов. В этой работе для кольцевых нейронных сетей (один из возможных вариантов) с достаточно серьезными упрощениями было проиллюстрировано в результате качественного анализа с использованием асимптотического исследования разнообразие возможных режимов их функционирования, многие из которых имеют биологические аналоги. Была также продемонстрирована возможность кратковременной памяти на кольцевых и локальных нейронных сетях. Автор считает эти результаты важными, так как они иллюстрируют один из возможных вариантов функционирования электрических цепей мозга при обработке информации, например при распознавании образов.

Ввиду нелинейности и регулярной модификации ряда электрических цепей первого типа в них могут реализовываться и вероятностные механизмы поведения в зависимости от сигнала, а точнее скорее создающие иллюзию такого поведения. Здесь уместно вспомнить слова лауреата Нобелевской премии Д. Хьюбеля [9]: "... я подозреваю, что те, кто говорит о случайных нейронных сетях, не утруждали себя ознакомлением с нейроанатомией". Думаю, что точнее здесь говорить о "псевдослучайном поведении клеток мозга" [40]. В этом случае, по-видимому, труднопредсказуемо меняется состав обрабатывающих, воспроизводящих нейронных цепей, т. е. меняется соответствующий состав электрической цепи из имеющихся элементов. В результате можно образно сказать, что обработка информации идет как бы "вероятностным нейронным ансамблем" [3]. Но не всегда. Важны и фиксированные цепи (см. ранее).

Таким образом, *электрические цепи первого типа могут демонстрировать огромное разнообразие в поведении в зависимости как от входящих, так и от проходящих по ним сигналов.*

Зачем же такое богатство в поведении? Ответ предельно прост — гигантские объемы входной информации. И, несмотря на указанное выше, все же ограниченные возможности мозга. Известно, что мозг функционирует и обрабатывает огромные потоки информации, причем часто работает с неполной информацией и знаниями. При этом решаются и задачи, которые не имеют однозначного ре-

³ Автор умышленно здесь использует термин "нейронные сети", характерный для работ по искусственному интеллекту и используемый в цитируемой монографии.

шения. С детства человек учится работать в таких сложных условиях и более или менее успешно справляется с решением подобных задач (большинство нормальных людей). Прежде всего удаётся это на основе существенных объемов закодированной в мозге информации и достаточно оперативной при этом обработке поступающей и имеющейся информации с использованием электрических сигналов. Экономичность же ее сохранения (и одновременно эффективность при обработке) достигается вследствие многочисленного иерархического кодирования информации в различных системах мозга. Именно гигантские объемы входной информации и являются своеобразным "двигателем" (инициатором) эволюции.

В связи с такими потоками информации автор считает, что сон имеет, прежде всего, физиологическое значение [1]. С одной стороны, мозгу нужен просто отдых (определенное восстановление возможностей), а с другой стороны, по-видимому, идет различная обработка (систематизация) информации (сжатие, сортировка, закрепление и т. п. [1, 25]). Что же касается сновидений, то этот (внутренний¹) режим работы мозга, скорее всего, связан с релаксационными процессами. Во всяком случае, то что происходит свидетельствует о более хаотическом прохождении электрического сигнала по нейронным цепям мозга, т. е. не управляемом (по крайней мере менее управляемом²) по сравнению с мышлением (см. выше). Следовательно, сновидения — "хаотический режим" работы мозга³. Интересен также вопрос о модификации цепей во сне. Если предположить, что идет определенная реструктуризация нейронных цепей, а времени для этого достаточно, то она также должна иметь место.

Список литературы

1. Майерс Д. Психология. Минск: Попурри, 2006. 848 с.
2. Бехтерева Н. П., Гоголицын Ю. Л., Кропотов Ю. Д., Медведев С. В. Нейрофизиологические механизмы мышления: Отражение мыслительной деятельности в импульсной активности нейронов. Л.: Наука, 1985. 272 с.
3. Чораян О. Г. Нейронный ансамбль (идея, эксперимент, теория). Ростов н/Д: Изд-во Ростовского университета, 1990. 88 с.
4. Вулдридж Д. Механизмы мозга. М.: Мир, 1965. 344 с.
5. Николс Дж. Г., Мартин А. Р., Валлас Б. Дж., Фукс П. А. От нейрона к мозгу. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 676 с.

¹ Он, по-видимому, наиболее близок к "чисто" внутреннему режиму работы мозга.

² Об этом свидетельствуют и данные нейрофизиологии сна [41].

³ Заметим, что некоторые мыслительные акты могут все же носить очень близкий, "псевдохаотический" характер. Об этом, в частности, также свидетельствуют известные данные о возможности творческого процесса во сне [25].

6. Экклс Дж. Физиология синапсов. М.: Мир, 1966. 396 с.
7. Хомская Е. Д. Нейропсихология. М.: Изд-во Моск. университета, 1987. 288 с.
8. Блум Ф., Лейзерсон А., Хофстедтер Л. Мозг, разум и поведение. М.: Мир, 1988. 248 с.
9. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990. 239 с.
10. Мозг. М.: Мир, 1984. 280 с.
11. Грей У. Живой мозг. М.: Мир, 1966. 300 с.
12. Иванов-Муромский К. А. Нейроэлектроника, мозг, организм. Киев: Наукова думка, 1983. 175 с.
13. Дельгадо Х. Мозг и сознание. М.: Мир, 1971. 264 с.
14. Пенфильд В., Робертс Л. Речь и мозговые механизмы. Л.: Медицина, 1964. 264 с.
15. Хорост М. Всемирный разум. М.: Эксмо, 2011. 288 с.
16. Фон Нейман Дж. Общая и логическая теория автоматов. В кн.: Тьюринг А. Может ли машина мыслить? М.: Гос. изд-во физико-матем. литер., 1960. С. 59—101.
17. Джаксон М. Б. Молекулярная и клеточная биофизика. М.: Мир, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 551 с.
18. Иванов-Муромский К. А. Нейрофизиология, нейрокибернетика, нейробионика. Киев: Вища школа, 1985. 240 с.
19. Кащенко С. А., Майоров В. В. Модели волновой памяти. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009. 288 с.
20. Волькенштейн М. В. Биофизика. М.: Наука, 1981. 576 с.
21. Бернацкий А. С. Загадочный и парадоксальный мозг. Минск: Нар. асвета, 2011. 176 с.
22. Лурия А. П. Основы нейропсихологии. М.: Изд-во МГУ, 1973. 375 с.
23. Бехтерева Н. П. Здоровый и больной мозг человека. Л.: Наука, 1988. 262 с.
24. Варганян Г. А. Проблемы управления памятью в эксперименте // Физиология человека. 1977. Т. 3, № 5. С. 789—795.
25. Иванов-Муромский К. А. Мозг и память. Киев: Наукова думка, 1987. 136 с.
26. Эделмен Дж., Маунткасл В. Разумный мозг. М.: Мир, 1981. 135 с.
27. Солсо Р. Когнитивная психология. СПб.: Питер, 2006. 589 с.
28. Рапопорт Г. Н., Герц А. Г. Биологический и искусственный разум. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2011. Ч. I, 184 с; Ч. II, 296 с.
29. Хомутов А. Е., Кульба С. Н. Анатомия центральной нервной системы: учеб. пособие. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 315 с.
30. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие. М.: Лаб. базовых знаний, 2004. 488 с.
31. Сеченов И. М. Избранные произведения. М.: Гос. учеб.-педаг. изд-во Минист. просв. РСФСР, 1958. 416 с.
32. Хокинс Дж., Блейкли С. Об интеллекте. М.: Вильямс, 2007. 240 с.
33. Макдональд М. Научи свой мозг работать. М.: Эксмо, 2010. 304 с.
34. Блинков С. М., Глезер И. И. Мозг человека в цифрах и таблицах. Л.: Медицина, 1964. 472 с.
35. Хакен Г. Принципы работы головного мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности. М.: ПЕР СЭ, 2001. 351 с.
36. Бабминдра В. П., Брагина Т. А. Структурные основы межнейронной интеграции. Л.: Наука, 1982. 164 с.
37. Гусельников В. И. Электрофизиология головного мозга (курс лекций): учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1976. 423 с.
38. Прибрам К. Языки мозга. М.: Прогресс, 1975. 464 с.
39. Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. Электроника ультрабольшой интегральной схем. М.: Мир, 1991. 327 с.
40. Эйди У. Р. Организация мозга: мозг как шумящий компьютер. В сб.: Основные проблемы электрофизиологии головного мозга. М.: Наука, 1974. С. 350—366.
41. Коган А. Б. Основы физиологии высшей нервной деятельности: учебник. М.: Высш. шк., 1988. 368 с.

НОРЕНКОВ Игорь Петрович (19.08.1933—31.12.2012)



Редколлегия журнала "Нано- и микросистемная техника" понесла тяжелую утрату... На 80-м году ушел из жизни известный ученый, блестящий преподаватель, талантливый организатор и замечательный человек, член редколлегии журнала — **Игорь Петрович Норенков**.

Основатель и до последнего времени руководитель кафедры систем автоматизированного проектирования МГТУ им. Н. Э. Баумана, Заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат Государственной премии СССР, академик РАЕН, доктор технических наук, один из ведущих специалистов в области современных компьютерных и информационных технологий, Игорь Петрович внес неоценимый вклад в развитие российской науки и образования.

И. П. Норенков родился 19 августа 1933 г., в 1960 г. закончил Приборостроительный факультет МВТУ им. Н. Э. Баумана (ныне МГТУ им. Н. Э. Баумана) по специальности "Математические машины". В 1964 г. группой сотрудников кафедры "Электронные вычислительные машины и системы" под руководством И. П. Норенкова была создана первая отечественная программа анализа электронных схем (ПАЭС), которая дала жизнь целому семейству соответствующих программных средств для предприятий радиоэлектронной промышленности. В 1975 г. за большой вклад в теорию и практику методов автоматизированного проектирования электронных схем Игорь Петрович был удостоен Государственной премии СССР.

Игорь Петрович являлся одним из пионеров компьютеризации проектно-конструкторской деятельности, руководителем одной из ведущих отечественных школ в области моделирования и оптимизации. В 1980 г. И. П. Норенковым была сформулирована концепция многоаспектного моделирования, которая в дальнейшем послужила основой для создания не имеющего в то время аналогов в мире универсального программного обеспечения для моделирования и анализа динамических систем с физическими разнородными элементами. Эти результаты позволили разработать единую методологию преподавания студентам различных специальностей основ автоматизированного проектирования. В последние десятилетия в работах И. П. Норенкова все большее внимание уделялось проблемам автоматизации трудно формализуемых проектных процедур структурного синтеза на основе использования современных информационных технологий.

И. П. Норенков в 1982 г. основал в МВТУ им. Н. Э. Баумана одну из первых отечественных кафедр в области систем автоматизированного проектирования, которая занимает ведущее место в системе подготовки высококвалифицированных специалистов в области автоматизации проектирования. В 1999 г. он принял участие в организации нашего журнала, который за эти годы стал всероссийской трибуной для специалистов в области микросистемной техники и нанотехнологий.

Все знали И. П. Норенкова как высокоинтеллектного ученого, которого отличали широкий научный кругозор, постоянное стремление двигаться вперед, доброжелательность, отзывчивость. В памяти друзей и коллег он останется очень светлым человеком.

**Редколлегия и редакция журнала
выражают глубокое соболезнование родным и близким покойного.
Вечная память о Игоре Петровиче Норенкове навсегда сохранится в наших сердцах.**

Rathkeen L. S. *Modern Technologies for Projecting, Construction and Producing of Nano- and Microelectromechanical Systems* 2
 On February 29, 2011 at scientific session of Department of nanotechnologies and information technologies (DNIT) of Russian academy of sciences (RAS) were discussed the problems of projecting, construction and producing of nanoelectromechanical and microelectromechanical systems (NEMS and MEMS). Much attention was paid for technologies of deep plasmatic treatment of MEMS structures with wide spectrum of aspect relations, producing of vibroacoustic micromechanical systems with fibre-optic information channel, quantum informatics of NEMS, superhighfrequency (SHF) systems on crystal with MEMS components on nanoheterostructures in gallium arsenide and technological bases of producing of microconvertors of moving parameters on bases of principles of mass transportation in electrochemical microsystems.
Keywords: Russian academy of sciences (RAS), Department of nanotechnologies and information technologies (DNIT) of RAS, technologies of deep plasmatic treatment of MEMS structures, wide spectrum of aspect relations, producing of vibroacoustic micromechanical systems, fiber-optic information channel, quantum informatics of NEMS, superhigh-frequency (SHF) systems on crystal, MEMS components on nanoheterostructures, microconvertors of moving parameters, principles of mass transportation in electrochemical microsystems

Pronin I. A., Averin I. A., Dimitrov D. T., Krasteva L. K., Papazova K. I., Chanachev A. C. *Research the sensitivity to Ethanol Junctions ZnO—ZnO:Fe Based on Thin Nanostructured Films Obtained by Sol-Gel-Technology*. 6
 This paper investigates the sensitivity to ethanol-based homojunction nanostructured layers ZnO—ZnO: Fe, obtained by the sol-gel technique. As the response was measured thermal electromotive force virtual thermocouple hot end of which is a contact on the ZnO layer near the interface of ZnO/ZnO:Fe, and the cold — contact on the surface of ZnO:Fe. Found that the maximum sensitivity have samples, the top layer which is formed by two or three dives into the sol. The trend of the temperature dependence of the response depends strongly on the thickness of the upper layer.
Keywords: nanostructured thin films of ZnO, ZnO doped with Fe, gas sensor

Bodunov D. S., Gavrilenko V. P., Zablotkiy A. V., Kuzin A. A., Kuzin A. Yu., Mityukhlyayev V. B., Rakov A. V., Todua P. A., Filippov M. N. *Calibration of Transmission Electron Microscopes Using the "10030—2011" Reference Material* 11
 We present the results of calibration of an JEM-2100 transmission electron microscope using the "10030—2011" reference material at nominal microscope magnification of 30000. The reference material was developed and manufactured in the Center for Surface and Vacuum Research. In the course of calibration, relative expanded measurement uncertainty (for a coverage factor of $k = 2$) was equal to 0,5 %.
Keywords: reference material, transmission electron microscope, calibration, uncertainty of measurements at calibration

Ponomarev D. S. *Manufacturing of InAlAs/InGaAs/InAlAs Nanoheterostructures Based on InP Wafers* 14
 Both theoretically and experimentally are studied band structures of the nanoheterostructures InAlAs/InGaAs/InP with single and composite quantum wells (QW). The Shottky — gate FET with $f_t = 110$ Ghz has been also developed.
Keywords: nanoheterostructure, A3B5 semiconductors, molecular-beam epitaxy, field effect transistor with Shottky gate

Minakov A. V., Yagodnicyna A. A., Lobasov A. S., Rudyak V. Ya., Bilsky A. V. *Experiment Calculated Investigation of fluids Mixing in T-Channel* 18
 In this article fluid flow and mixing regimes in T-type micromixer in wide range of Reynolds numbers were investigated. Numerical modelling and experimental micro-PIV and micro-LIF methods were used. The structure of the flow and its influence on mixing was studied. The dependences of the friction factor and mixing efficiency on the Reynolds number were obtained. Sharp increase of mixing efficiency in the transition from symmetric to asymmetric flow regime at steady-state flow was shown.
Keywords: microchannels, MEMS technologies, micro-PIV, micro-LIF, CFD

Milkin S. S., Starodubov A. V., Herman S. V., Markin A. V., Gorin D. A., Wenig S. B., Kalinin Yu. A. *Peculiarities of Measurement Technique of Colloidal and Emulsion Systems at Microwave Frequencies* 22
 The peculiarities of technology to measure the properties of colloidal and emulsion systems at microwave frequencies have considered. A number of coaxial measuring cells have designed. The optimization of coaxial measuring cells design for studies in the frequency range of 9 kHz to 3 GHz have carried out. The results of measurements of the reflection and transmission electromagnetic waves coefficients for test samples of oil, kerosene, colloidal solution of iron oxide, the inverse emulsion (water / kerosene) with iron oxide nanoparticles have considered.
Keywords: colloid and emulsion systems, the interaction of electromagnetic waves with matter, physical experiment

Latokhin D. V., Voronkov E. N. *Numerical Modeling of Microplasma Breakdown in Semiconductor Structures* . . . 26
 In this paper we report the numerical simulation of microplasmas in disordered semiconductor structures under conditions similar to those of microplasma breakdown in films of As_2Se_3 , one of the chalcogenide vitreous semiconductors. The model allows describing the process of microplasma breakdown in amorphous films.
Keywords: semiconductor, microplasma, conductivity, breakdown

Amelichev V. V., Aravin V. V., Belov A. N., Krasnyukov A. Yu., Reznov A. A., Saurov A. N. *Developing Integral Components for the Amplification of Magnetic Signal in Wireless MEMS Based on Magnetoresistive Elements*. 29

The results of the integral components of a magnetic signal amplification based on films permalloy. The methods to increase the sensitivity of magnetoresistive transducers and construction on their wireless MEMS-based magnetic coupling to transfer information over short distances. The results of simulation of the magnetic field in permalloy strips. The results of the formation of a magnetic field concentrator 10–11 micron thickness using electrochemical deposition.

Keywords: wireless mems, integrated microstructure, component gain, concentrators, magnetic field, the magnetic coupling, permalloy, thin films and construction principles of electronic component base, electrochemical deposition

Novikov S. G., Gurin N. T., Berintsev A. V., Rodionov V. A., Shtan'ko A. A. *Semiconductor Photoconverters of Coordinates and Angles with Negative Differential Conduction*. 33

The present work concerns functional semiconductor photoconverters of coordinates and angles with negative differential conduction (NDC) devised on the base of a combined unit with NDC, and two types of semiconductor position-sensitive photodetectors — linear and arc geometry. The results of comparative experimental studies are presented. Potential fields of application are defined.

Keywords: photoconverter, coordinate photosensitivity, negative differential conduction

Burdin D. A., Fetisov Yu. K., Chashin D. A., Ekonomov N. A., Savchenko E. M. *Piezoelectric Resonance Sensor of Magnetic Field with Planar Excitation Coil*. 37

The piezoelectric sensor of permanent magnetic field using combination of the Ampere force, the piezoelectric effect, and acoustic resonance was fabricated and investigated. The sensor is a bimorph lead zirconate titanate plate fixed at one end with a planar electromagnetic coil at the other end. The piezoelectric bimorph generates an ac voltage which magnitude is proportional to the applied magnetic field while ac current of the frequency equal to the frequency of bending oscillation of the plate passes through the coil. The sensor has a sensitivity of ~ 200 V/(A · T) in the field range of $\sim 10^{-7} \dots 0,3$ T and the temperature range of 220–370 K.

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

Gridchin V. A., Chebanov M. A., Vasil'ev V. Yu. *The Influence of Thermal Strains on the Resonant Pressure Sensors Thermal Stability*. 41

Simulation results of thermal strain influence on the frequency characteristics of the resonant pressure sensor (RPS) have been presented. A strong dependence of resonance frequency temperature sensitivity of the RPS on the thickness of silicon dioxide films used in the sensors manufacture process has been shown. Thermo-compensation method of the resonant element with the membrane back-side silicon dioxide film has been suggested.

Keywords: resonant pressure sensor, thermal strains, finite element method

Abramov I. I. *The Brain is an Object of Organic Hybrid Nanoelectronics, or Another Point of View. Part II*. 45

A new interpretation of human brain as an organic hybrid nanoelectronics object created by Nature is presented. The nearest analogue in artificial electronics is an integrated circuit of micro- and nanoelectronics. Therefore the comparison of the neuronal circuits of the brain with integrated circuits was made and their basic differences were determined. The proposed interpretation and its consequences allow, on the one hand, to analyze the principles of the brain functioning more deeply, and, on the other — to suggest a complex approach of brain investigation, based on multilevel simulation combined with experimental methods. In the part II the answer to the following question is presented: "How does the brain function from the point of view of a specialist in electronics?"

Keywords: the brain, nanoelectronics, an electronic interpretation

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 Т. В. Пчелкина

Сдано в набор 18.01.2013. Подписано в печать 25.02.2013. Формат 60×88 1/8. Заказ МС313.

Цена договорная

Оригинал-макет ООО «Авансд солюшнз».

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