

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 4 (117) ♦ 2010

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

Издается с 1999 г.

Главный редактор
Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора
Лучинин В. В.

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.
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.
Петросьянц К. О.
Петрунин В. Ф.
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"

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Раткин Л. С.** Новые разработки Российской академии наук в сфере нанотехнологий 2
- Селезнев В. А., Принцип В. Я., Корнеев И. А.** Чипы с полупроводниковыми трубками-зондами для сканирующей туннельной микроскопии 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

- Гирфанова Н. А.** Обзор и сравнительная характеристика методов определения качества изображения в пассивных системах автофокусировки 9
- Гриджин В. А., Лобач О. В., Дикарева Р. П.** Численное моделирование микроэлектронного сенсора теплового потока 13
- Новиков С. Г., Гуринов Н. Т., Корнеев И. В.** Моделирование и исследование негatrona с передаточной N -образной вольт-амперной характеристикой 17

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Гринькин Е. А., Бабаевский П. Г., Жукова С. А., Жуков А. А., Обижаев Д. Ю.** Влияние энергетических и геометрических параметров поверхности полиимида с регулярным микрорельефом на анизотропию сидячей капли воды, анизотропию и гистерезис краевого угла смачивания 21
- Слепцов В. В., Тянгинский А. Ю., Артюхов С. А., Церулев М. В.** Определение концентрации металлов в наноструктурированных жидких средах лазерно-оптическим методом. Часть 2. Нечеткое моделирование 31
- Смолин В. К.** Использование жидкого азота в процессах формирования элементов микроэлектронных структур 34
- Агасиев А. А., Ахундов Ч. Г., Мамедов М. З., Сармасов С. Н., Мамедов Г. М.** Наноструктурные и морфологические свойства пленок SrTiO_3 36

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

- Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А.** Детекторы с квантовыми точками Ge/Si для инфракрасного диапазона 39
- Ехменина И. В., Шешин Е. П., Чадаев Н. Н.** Источники излучения на основе наноструктурированных автокатодов 45
- Белозубов Е. М.** Тонкопленочные емкостные микроэлектромеханические системы с монокристаллическим диэлектриком 48

ИНФОРМАЦИЯ

- Contents** 55

Аннотации на русском и английском языках с 1999 г. по настоящее время находятся в свободном доступе на сайтах журнала (<http://www.microsystems.ru>) и научной электронной библиотеки (<http://elibrary.ru>). Электронные версии полнотекстовых статей расположены на сайте журнала: с 1999 г. по 2003 г. в разделе "ПОИСК СТАТЕЙ", а с 2004 г. — в разделе "АРХИВ".

ПОДПИСКА:

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

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

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 623.3

Л. С. Раткин, канд. техн. наук, нач. отдела научных разработок ООО "АРГМ"
e-mail: rathkeen@bk.ru

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК В СФЕРЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

В 2009 году Российская академия наук (РАН), отмечая 286-летие 08.02.2010, провела ряд научных сессий, на которых, в частности, рассматривались новые проекты и перспективные разработки РАН в сфере нанотехнологий. Особое внимание уделялось теоретическим и практическим аспектам проектирования наноиндустриальной продукции и вопросам взаимодействия академической и вузовской науки. Также затрагивалась проблематика коммерциализации разработок в сфере наноиндустрии и сокращения бюджета по ФЦП "Развитие инфраструктуры наноиндустрии на 2008—2010 годы".

Ключевые слова: РАН, нанотехнологии, наноиндустрия, ФЦП

В ФИАН при температурах, превышающих критическую для перехода "экситонный газ — электронно-дырочная жидкость", по спектрам фотолюминесценции в наногетероструктурах Si/SiGe/Si выявлен и изучен возникающий при увеличении концентрации экситонов в потенциальной яме квазидвумерного SiGe-слоя переход Мотта. В формирующейся при переходе Мотта электронно-дырочной плазме необходимая концентрация частиц идентифицирована по форме линии люминесценции.

Сотрудниками ИРЭ РАН в терагерцовом диапазоне частот выявлен эффект появления щели в фоновом спектре наноструктурных керамик и проведен анализ причин, способствующих ее формированию. Доказан факт существенного влияния структуры межзеренных границ на положение верхнего края щели в спектре фононов. Также установлено смещение щели в ВЧ область фоновой спектра за счет включений, характерные размеры которых меньше размеров зерна основного материала керамики.

Коллективом ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН установлена возможность достижения в графене температуры порядка нескольких кельвинов для перехода в макроскопически сверхпроводящее состояние. Эффект достигим при размещении на листе графена на расстоянии в доли микрометров между соседними

островками сверхпроводящего металла других островков с размерами несколько десятков нанометров.

Лабораториями ИРЭ РАН и ФТИ РАН в сотрудничестве с МИФИ и МИСиС разработан обладающий эффектом памяти формы с обратимыми деформациями активного элемента композитный функциональный материал, из которого создан прототип микропинцета размерами $12 \times 3 \times 1$ мкм. Инструмент применим для 3D-манипуляций с органеллами, живыми клетками и углеродными нанотрубками.

В ИАПУ ДВО РАН при формировании приповерхностного тонкого слоя сплава $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ с большим, чем у исходной подложки, параметром решетки выявлены структурные превращения в монослоях In на подложке Si. Управление параметром решетки обеспечивает ведение атомного конструирования на поверхности и изучение влияния на процесс формирования наноструктур поверхностных напряжений.

Сотрудниками ИСАН усовершенствована технология формирования молекулярных и атомных наноструктур размером до 30 нм методами атомной оптики, обеспечивающая создание упорядоченных массивов, содержащих до миллиона идентичных наноструктур из биомолекул, полупроводниковых элементов и металлов. Конструируемые наноструктуры применимы в нанобиосенсорах и наноэлектронных приборах.

В ИПМТ ДВО РАН исследован метод модификации стеклянного слоя стекломаталлокомпозита пространственной наноструктуры для придания материалу ударостойкости и высокой прочности для производства прочных корпусов глубоководной техники.

Коллективом ИФТТ РАН разработана технология выращивания сапфировых лент с капиллярными каналами для создания скальпелей с флуоресцентной диагностикой резизируемой ткани. При проведении хирургической операции по удалению злокачественных новообразований диагностируются ткани в окрестности режущего острия. Изучение в институте эффекта осциллирующий фотонапряжения при смене концентрации 2D-электронов в полупроводниковой наноструктуре под влиянием СВЧ излучения способствовало разработке нового принципа детектирования в терагерцовом диапазоне. Когерентное резонансное усиление плазменных волн с выпрямлением их на специально приготовленном дефекте в электронной системе позволяет управлять знаком и амплитудой фотонапряжения. Сконструирован прототип многопиксельной матрицы детекторов для получения изображений со спектральным разрешением 2 ГГц в диапазоне 0,1...0,6 ТГц при мощности эквивалентного шума $(1...3) \cdot 10^{-14}$ В/Гц^{1/2} со временем срабатывания элемента матрицы 1 нс при температурах 140...170 К.

В ИФМ РАН для измерения с субнанометровой точностью волновых деформаций объективов и форм светосильных оптических поверхностей, в том числе асферических, разработан оптический интерферометр с дифракционной волной сравнения, ряд значений характеристик которого значительно выше, чем у лучших зарубежных аналогов. Прибор обеспечит создание в РФ производства объективов сверхвысокого разрешения для астрономии, рентгеновской микроскопии и проекционной литографии.

Сотрудниками ИАиЭ СО РАН сконструированы лазеры с большим диапазоном перестройки частоты в полностью волоконном исполнении с использованием в качестве селектора частот волоконных брэгговских решеток, синхронная перестройка которых управляет работой лазерного резонатора. На базе легированных иттербием, фосфором и эрбием светодиодов в спектральных областях 1100, 1300 и 1550 нм достигнут диапазон непрерывной перестройки 45, 50 и 65 нм соответственно, при этом рассогласование резонансных длин волн решеток при сжатии влияет на ограничение диапазона перестройки.

Реализация совместного проекта в МГУ им. М. В. Ломоносова, ИОФ РАН, ИРЭ РАН и ГНЦ РФ "Акустический институт имени академика Н. Н. Андреева" в сфере наноакустики (наофононики) по разработке акустических метаматериалов позволила выявить методы формирования "отрицательных" акустических сред с противоположно направленными групповой и фазовой скоростями. Ряд опытов на кристаллах с сильной анизотропией сдвиговой упругости совместно с исследованиями аномальной рефраксии и фокусировки позволили установить степень влияния акустической кавитации на эффективность методов адресной доставки лекарств. В частности, 8-кратное увеличение концентрации лекарства в опухолевой ткани достижимо при применении 100-нанометровых газовых пузырьков в полимерной оболочке в сочетании с ультразвуком.

Принцип взаимодействия прямолинейных электронных пучков с медленными плазменными волнами — в основе разработанных в ИОФ РАН плазменно-пучковых источников сверхмощного когерентного СВЧ излучения. Высокое давление и выходная мощность излучения свыше 50 МВт обеспечивается плазменным усилителем с релятивистским сильноточным электронным пучком в импульсах порядка 10...20 нс с перестройкой частоты излучения 2,5...3,5 ГГц.

Для наблюдения квантовых эффектов в макроскопических масштабах в ПИЯФ РАН была разработана периодическая магнитная структура с применением постоянных магнитов с градиентом 2,8 Тл/мм. Проведенные опыты на пучке ультрахолодных нейтронов с длиной волны порядка 10 нм в реакторе Института Лауэ—Ланжевена позволили зафиксировать макроскопическое квантование траекторий движения нейтрона в магнитном канале с границами, сформированными градиентом магнитного поля квадрупольного типа.

В ИПЛИТ РАН изучен процесс наностереолитографии при одно- и двухфотонном иницировании полимеризации. Сформулированы принципы конструирования биоактивных имплантантов из мине-

рал-полимерных композиций методом лазерной стереолитографии.

Вычислительные мощности многопроцессорного кластера ИПРИМ РАН применялись для молекулярно-динамического и квантово-механического моделирования структуры и потенциалов взаимодействия элементов композиционных материалов на базе гибкоцепной полимерной матрицы и наноразмерных наполнителей (минерал шунгит, силикат, аморфный углерод). В программе MDPOL моделировался NPT-ансамбль при нормальных условиях. Для композита (полимерной матрицы с нановключениями) рассчитан коэффициент всестороннего сжатия. Для модельных кластеров полимерных нанокомпозиций при их растяжении (деформировании) вплоть до разрыва проведен расчет микроскопических механических характеристик.

В ИСПМ РАН методом направленного конструирования полисилоксановых молекулярных систем с заданными свойствами созданы функциональные кремнийорганические производные олигосилоксанов. Обоснованы уникальные полупроводниковые свойства самоорганизованных нанослоев диметилхлорсилановых производных диалкилквиноксифена, на основе которых получены "самособирающиеся" полевые транзисторы и микросхемы, состоящие из нескольких сот одновременно работающих транзисторов, что можно использовать для создания сложных микросхем посредством самоорганизации органических полупроводников.

Для описания демпфирующей роли водородсодержащей аморфной границы в материале с наночастицами сотрудниками ИПМаш РАН сконструирована механико-математическая модель, свидетельствующая о повышении термодинамической устойчивости матрицы. Изучено движение жидкостей в наноканалах со стенками аморфной или кристаллической структуры. В частности, доказаны факты возможности управления вязкими свойствами и расходом жидкости при различных типах вибраций стенок каналов, а также упорядочения прилегающих к стенкам слоев жидкости в форме определенных структур в нанозазорах размером 3...20 нм на кристаллической структуре (но не аморфной). Кроме того, в институте получены высокоориентированные механические ненапряженные бездефектные нанопленки на подложках при большом рассогласовании решеток пленки и подложки (15...25 %). Новая методика осаждения карбида кремния на кремний позволила получить монокристаллические нанопленки карбида кремния кубического и ряда гексагональных полиморфов. Новый механизм зарождения в нанокомпозитных материалах трещин связывает их появление с дислокациями больших векторов Бюргерса, формируемых под влиянием наноскопического идеального сдвига из-за растягивающего внешнего напряжения. Его высокие значения в нанокомпозитных материалах достигаются при ударных нагрузках.

В СПИИ РАН создана компьютерная модель низковольтного ионного микроскопа с размерами ионно-оптической колонны $50 \times 50 \times 120$ мкм. Повышение разрешения достигается посредством принципа миниатюризации колонны и его ионно-

оптических линз, снижающих геометрические аберрации, что позволяет выборочно удалять единичные молекулы в мономолекулярной 2D-решетке, наносимой на кремниевую подложку для создания кубитов квантового молекулярного компьютера.

Измерение в ИНЭПХФ РАН комплексных диэлектрических характеристик композитов на частоте 2,73 ГГц для оптимизации методов синтеза высоконаполненных композиционных материалов с углеродными наночастицами подтвердило высокий уровень радиопоглощающих свойств. Испытания также показали, что у композитов с углеродными нанотрубками механические характеристики выше.

В программной оболочке NanoMaker на базе современного сканирующего электронного микроскопа фирмы Zeiss EVO-50 в ИПТМ РАН создан программно-аппаратный комплекс для электронной литографии с блоками динамической фокусировки на площади до 100×100 м, панорамной съемки-экспонирования и разрешения литографии 20...300 нм. Технические параметры отечественного электронного нанолитографа соответствуют значениям характеристик европейских аналогов при меньшей цене российского прибора.

В ИСВЧПЭ РАН исследовано влияние электрических полей свыше 10^5 В/см и их градиентов, возникающих в РНЕМТ-нотранзисторах (InAlAs/InGaAs/InAlAs) с длиной канала 30...50 нм. Достигнута высокая степень подвижности 2D-электронов с помощью технологии получения на подложках InP эпитаксиальных наногетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs, на которых с применением трехслойной системы электронорезистов и электронной литографии создана технология конструирования высокоскоростных РНЕМТ-транзисторов с затвором длиной 180 нм и грибообразной формой при плотности тока до 650 мА/мм.

Проведенное в НИИСИ РАН изучение особенностей физических процессов в квантоворазмерных структурах кремний-на-изоляторе с моделированием основных электрофизических характеристик транзисторов позволило, в частности, разработать тестовые структуры наноразмерных ячеек постоянных запоминающих устройств и методы расчета шаблонов для субволновых структур.

В ФТИАН созданы квантовая модель полевого нанотранзистора в ультратонком слое (2...5 нм) кремния-на-изоляторе и технология плазменно-иммерсионной ионной имплантации для ультрамелких $p-n$ -переходов в микросхемах с критическими размерами 22...32 нм. Метод вычисления скрытых 3D-изображений с учетом топографии фотошаблонов разработан для 193-нм источника света для 45-нм и 65-нм проектных норм. Исследовано асимптотическое поведение высокотемпературной намагниченности ансамбля наночастиц в слабом магнитном поле с изучением эффекта в экспериментальных кривых намагничивания никеля. Рассмотрены атомные механизмы релаксации упругих напряжений в условиях гетероэпитаксиального роста с совершенствованием рентгеновской диагностики магнитных полупроводниковых гетероструктур с наноразмерными слоями. Разработана технология плазменных процессов формирования 3D микро- и наност-

руктур (микроконденсаторы, микроакселерометры, микрогирометры и микропереключатели) и сконструированы на их основе экспериментальные приборы микро- и наносистемной техники.

Общая методология конструирования ранее не известных молекулярных ансамблей из связанных пиррольных и бензотиофеновых гетероциклических систем, созданная в ИрИХ СО РАН, базируется на высокотехнологичной и атом-экономной реакции ацилбензотиофенов с ацетиленом и гидроксиламином в присутствии сверхосновных катализаторов. Созданные гетероциклические ансамбли применимы для дизайна наноструктурированных флуорофоров, превосходящих известные аналоги по стабильности и интенсивности эмиссии, что может быть использовано при создании нового поколения оптоэлектронных наноматериалов.

В ИСОИ РАН разработана информационная технология для проведения численных экспериментов в нанопотонике. Анализ дифракции света на широком спектре устройств микро- и нанооптики основан на численном решении системы уравнений Максвелла.

Новый принцип создания наноэлектромеханических систем ("наномускул") для создания высокоэффективных молекулярных машин и переключателей, предложенный в ИФХЭ РАН, основан на редокс-управляемом изменении расстояния между палубами многослойных структур за счет изменения размера металлоцентра. Примером молекулярной машины является бискраунфталоцианинат церия.

Выводы

- Даже неполный перечень проводимых в учреждениях РАН разработок свидетельствует о высоком уровне фундаментальных исследований [1, 2] и необходимости продолжения финансирования, в частности, в сфере нанотехнологий. Сокращение расходов федерального бюджета 2010 г. на научные исследования по сравнению с 2009 г. на 7,5 млрд руб., из них на 3 млрд руб. — на фундаментальную науку, может негативно повлиять на уровень российских разработок и укрепление позиций отечественных научных школ на мировом рынке [3].
- Запланированное сокращение бюджетных средств по Федеральному агентству по науке и инновациям РФ на финансирование ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2012 годы" и "Развитие инфраструктуры наноиндустрии на 2008—2010 годы" нецелесообразно, так как повлияет на снижение темпов роста производства наноиндустриальной продукции и развитие нанотехнологий в России.

Список литературы

1. **Отчетный доклад** Президиума Российской академии наук. М.: Наука, 2009.
2. **Терехов А. И.** Нанотехнологии и наноматериалы в современном мире // Вестник Российской академии наук. 2009. Т. 79. № 9. С. 781—788.
3. **Александрова А.** Дальше — меньше. Научный бюджет сократится // ПОИСК. Еженедельная газета научного общества. 15 января 2010 г. № 1—2 (1075—1076).

В. А. Селезнев, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
В. Я. Принц, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лаб.,
И. А. Корнеев, аспирант,
 Учреждение Российской академии наук Институт
 физики полупроводников им. А. В. Ржанова
 Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск
 e-mail: prinz@isp.nsc.ru

ЧИПЫ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ТРУБКАМИ-ЗОНДАМИ ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ

Описан метод массового изготовления чипов с трубчатymi зондами для сканирующей туннельной микроскопии из гетероструктур $\text{InP}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$. Технология базируется на методах самосворачивания тонких напряженных гетеропленок в трубки, анизотропном и селективном травлении подложки InP и методах, используемых в технологии изготовления интегральных схем. Впервые изготовлены микротрубки из гетеропленок $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ с использованием селективного анизотропного травления подложки InP . Созданные чипы с полупроводниковыми трубками-зондами перспективны для применений в высоковакуумной сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии, спиновой туннельной микроскопии и микроскопии ближнего поля.

Ключевые слова: сканирующая туннельная микроскопия, полупроводниковые трубки-зонды, самосворачивание напряженных гетеропленок

Введение

Развитие микро- и нанотехнологий открыло возможности для манипулирования микро- и нанобъектами и даже отдельными молекулами и атомами. Значительный прорыв в данных исследованиях связан с созданием метода сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) [1]. Данный метод позволяет изучать свойства поверхности проводящих материалов на атомарном уровне [2], дает возможность исследовать распределение по поверхности таких характеристик, как работу выхода, локальную плотность состояний, тип проводимости, положение уровня Ферми, ширину запрещенной зоны [3–5].

Возможности СТМ далеко не исчерпаны и постоянно расширяются, например, замена металлических зондов на монокристаллические полупроводниковые зонды существенно расширило возможности СТМ и сканирующей туннельной спектроскопии (СТС) [6, 7]. В работах [8, 9] было показано, что использование зондов из GaAs позволяет реализовать режим спиновой СТМ, а зондов из InAs — осуществить режим СТМ с фильтрацией по энергии [6]. Стандартными методами изготовления полупроводниковых игл являются механическое скалывание или анизотропное травление объемных материалов [6, 8–10].

Отсутствие подходящих технологий массового изготовления зондов из различных полупроводниковых материалов и гетероструктур существенно ограничивает широту их использования.

В настоящей работе предлагается метод изготовления зондов для СТМ на основе технологии самоформирующихся микро- и нанотрубок из напряженных полупроводниковых гетеропленок [11–13]. Трубки имеют воспроизводимые геометрические размеры, обладают высокой механической прочностью, обусловленной совершенством монокристаллических пленок. Диаметр полупроводниковых и гибридных трубок задается с прецизионной точностью от 100 мкм до 2 нм [11–13]. Микро- и нанотрубки могут быть сформированы из широкого набора материалов [11–17] и с помощью литографии размещены в любом заданном месте подложки.

К настоящему времени с использованием технологии самосворачивающихся гетеропленок создан ряд уникальных приборов и устройств: трубчатые лазеры [18, 19], сверхбыстродействующие трубчатые анемометры [20–22], оригинальные нанодвигатели [23, 24], метаматериалы для терагерцового диапазона [25], наноинструменты для операций на живых клетках [26–31].

В данной работе мы демонстрируем еще одно практическое применение самосворачивающихся гетеропленок для создания зондов туннельной микроскопии. Преимущество трубчатых зондов по сравнению с изготовленными из объемных материалов иглами заключается в том, что трубки могут быть сформированы из сложных многослойных гетероструктур, имеющих необходимую для СТМ-исследований зонную структуру (например, стенка трубки содержит квантовую яму с двумерным электронным газом или массивы квантовых точек). Важным является и то, что стенка трубки может одновременно являться оптическим резонатором [18, 19], что делает перспективным использование трубок в микроскопии ближнего поля, в спиновой туннельной микроскопии и спектроскопии. Подчеркнем, что для реализации спиновых СТМ и СТС необходимо использовать зонды из полупроводниковых соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ [8, 9].

Целью данной работы является разработка лабораторной технологии изготовления массивов чипов с трубчатыми зондами, выступающими за край, из напряженных гетероструктур $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$.

Требования к конструкции и выбор гетероструктуры

Ранее на примере напряженных гетероструктур GaAs/AlAs/InGaAs/GaAs [26–28], Si/SiGe/Si/Si [29–31] было продемонстрировано изготовление чипов с трубками, выступающими за край, для операций на отдельных живых клетках и для внутриклеточных инъекций. Часть разработанных методов и технологических приемов может быть успешно применена и для изготовления чипов с трубками-зондами для СТМ.

Перечислим основные требования к конструкции чипа с трубкой-зондом:

- размеры чипа должны позволять его установку в держатель стандартной СТМ-головки;
- трубка должна быть ориентирована перпендикулярно к краю чипа для упрощения установки трубки-зонда перпендикулярно исследуемой поверхности;
- область трубки, выступающей за край чипа, должна составлять несколько единиц или десятков микрон. Чем короче трубка, тем выше ее изгибная механическая жесткость, меньше амплитуда механических колебаний свободного конца и, соответственно, меньше шумов при СТМ-измерениях;
- высокая проводимость иглы, которая связана с толщиной стенки, а соответственно, и диаметром трубки [11–13]. В случае полупроводников важно учитывать, что при толщине стенки менее 5 нм все свободные носители могут оказаться захваченными на поверхностные состояния, что приведет к обеднению и отсутствию проводимости. Это накладывает ограничение на минимальный диаметр трубок (диаметр трубок должен быть больше 50 нм).

В данной работе мы использовали трубки микронных диаметров, свернутых из полупроводниковых гетеропленок толщиной в несколько десятков нанометров. Острым концом туннельного зонда будет вершина пленки, изогнутой в форме желоба (рис. 1, б, см. третью сторону обложки), а толщина пленки будет одним из контролируемых параметров размеров острия. На рис. 1 приведен один из простых способов изготовления чипов с трубками-зондами, когда вершина сворачиваемой трубки выходит в процессе ее формирования за край подложки. Способ легко реализуем, однако оставшаяся в месте сворачивания трубки часть подложки затрудняет подвод вершины зонда к исследуемой поверхности.

В данной работе предлагается в качестве жертвенного слоя использовать подложку, которая будет полностью удаляться в процессе формирования трубки под одним из ее концов, что устраняет вышеупомянутую проблему. Этот вариант можно осуществить, например, на гетероструктурах SiGe/Si, выращенных на подложке Si, однако для реализации спиновых СТМ и СТС необходимо использовать соединения $A^{III}B^V$ [8, 9]. Таким образом необходимо было найти гетеросистему соединений $A^{III}B^V$, на которой можно реализовать одновременное травление подложки и формирование трубки.

InP является материалом, на котором можно выращивать совершенные эпитаксиальные гетеропленки соединений $A^{III}B^V$, а также осуществлять его высокоселективное травление по отношению к выращенным на нем гетеропленкам [32–35]. В работах [33, 34] продемонстрировано применение селективного анизотропного жидкостного травления подложек InP в растворах HCl для формирования мембран и подвешенных мостиков из выращенных пленок $In_{0,53}Ga_{0,47}As$.

Для формирования трубок необходимо вырастить напряженную гетеропленку, содержащую сжатый и растянутый слои. Постоянная решетки InP находится

приблизительно посередине между постоянными решетки GaAs и InAs. Поэтому на подложке InP можно реализовать ситуацию, когда слои выращенной двухслойной гетеропленки будут упруго сжаты и растянуты на одинаковую величину. В этом случае при освобождении гетеропленки от связи с подложкой и формировании трубки будет отсутствовать деформация сжатия или растяжения вдоль оси трубки и могут быть изготовлены наиболее совершенные трубки.

Постоянная решетки пленки $In_xGa_{1-x}As$ совпадает с постоянной решетки InP подложки при $x = 0,53$. Если на подложке InP вырастить два слоя $In_xGa_{1-x}As$, имеющих x меньше и больше значения 0,53 на одинаковую величину, например на 0,11, можно получить подходящую структуру.

Таким образом, выбор профиля гетероструктуры был осуществлен с учетом следующих важных положений:

- толщина пленки должна быть меньше критической толщины псевдоморфного роста;
- удвоенная область обеднения должна быть меньше толщины пленки;
- должна быть сохранена высокая селективность травления $In_xGa_{1-x}As$ при увеличении x (при $x = 1$ селективность отсутствует).

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке InP (001), готовой для эпитаксии (*epi ready*), была выращена исходная гетероструктура. Сначала в сверхвысоком вакууме выращивался буферный слой InP толщиной 200 нм, затем выращивалась гетеропленка $In_{0,64}Ga_{0,36}As/In_{0,43}Ga_{0,57}As$ с толщиной каждого слоя 50 нм. Для обеспечения проводимости гетеропленка легировалась кремнием до концентрации $2 \cdot 10^{-18} \text{ см}^{-3}$ в процессе эпитаксии.

Технология изготовления трубчатого зонда

Основные шаги изготовления чипов с трубками показаны на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки). На поверхности выращенной гетероструктуры методом оптической литографии вытравливается мезаструктура (рис. 2, а), имеющая планарную геометрию, соответствующую размерам будущего чипа. Формирование мезаструктуры необходимо для обеспечения доступа селективного анизотропного травителя к подложке InP на последующих технологических шагах. Важной является ориентация мезаструктуры относительно кристаллографических направлений. Именно благодаря анизотропии скоростей травления подложки InP достигается сворачивание гетеропленки в заданном направлении. В нашем случае края мезаструктуры, с которых будет происходить сворачивание трубок, ориентированы вдоль $\langle 100 \rangle$ — направления быстрого травления InP. Следующим шагом формируется низкоомный контакт Au к гетеропленке (рис. 2, б) с помощью дополнительного напыления слоя золота толщиной 200 нм. Далее задается планарная геометрия чипов с помощью окон в маскирующем слое фоторезиста (рис. 2, в), через которые проводится глубокое травление подложки

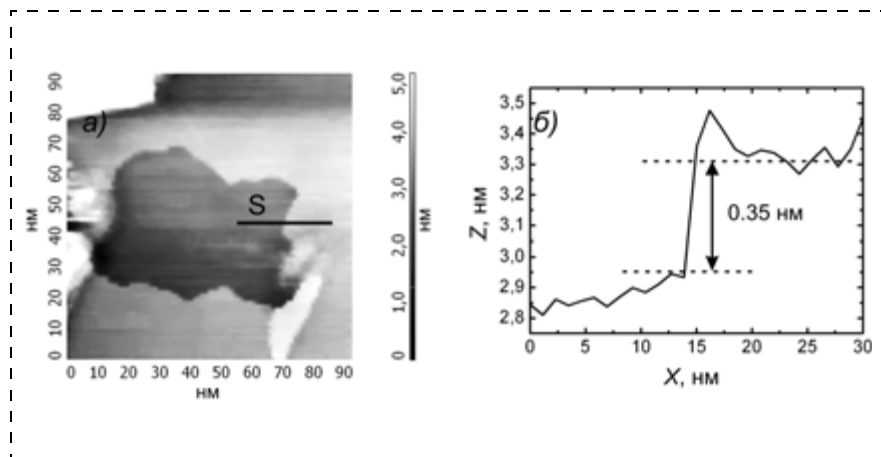


Рис. 4. СТМ-изображение поверхности ВОПГ с моноатомной ступенью (а); профиль вдоль линии *S*, отмеченной на рис. 4, а (б)

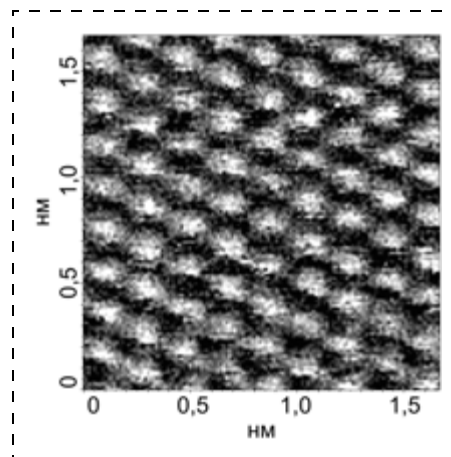


Рис. 5. СТМ-изображение поверхности пиролитического графита, полученное с псевдоатомным разрешением на воздухе. Изображение получено с использованием $\text{In}_{0,64}\text{Ga}_{0,36}\text{As}/\text{In}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{As}$ -микротрубки при напряжении смещения $-0,6$ В

InP в растворе $3\text{HCl} : 1\text{H}_3\text{PO}_4$ (рис. 2, в). Затем удаляется в ацетоне фоторезист (рис. 2, г) и через вскрытые в гетеропленке окна проводится селективное травление подложки InP в растворе $3\text{HCl} : 1\text{H}_3\text{PO}_4$, которое приводит к формированию отдельных чипов с $\text{In}_{0,64}\text{Ga}_{0,36}\text{As}/\text{In}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{As}$ -микротрубками, выступающими за края чипа (рис. 2, д). На заключительном этапе чипы с микротрубками тщательно промываются в деионизованной воде и высушиваются с помощью метода сверхкритической CO_2 -сушки [36], который препятствует разрушению созданных структур силами поверхностного натяжения испаряющейся жидкости.

С помощью разработанного технологического маршрута изготовлены чипы с $\text{In}_{0,64}\text{Ga}_{0,36}\text{As}/\text{In}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{As}$ -микротрубками диаметром 10 мкм, выступающими за край и перпендикулярными к краю чипа (рис. 3, см. третью сторону обложки). Длина выступающей части составляет 10–100 мкм и контролируется временем травления подложки InP. Разработанный метод позволяет за один технологический цикл изготовить более 100 чипов.

Эксперименты по тестированию созданных зондов были выполнены на сканирующем зондовом микроскопе Solver-Pro компании NT-MDT. Данный микроскоп работает на воздухе, что затрудняет получение атомного разрешения. Поэтому для получения тестовых изображений была выбрана поверхность высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ). Поскольку графит не окисляется на воздухе и имеет совершенную спайность вдоль плоскости (0001), моноатомно-гладкая и атомно-чистая поверхность была получена скалыванием графита вдоль этой плоскости.

На рис. 4 приведено СТМ-изображение (рис. 4, а) поверхности ВОПГ, полученное с помощью изготовленного чипа с трубчатым зондом. Видно, что созданные чипы позволяют регистрировать моноатомные ступени на поверхности графита (рис. 4, б).

Сканирование с большими скоростями на меньшей площади позволяет достичь псевдоатомного разрешения поверхности ВОПГ на воздухе (рис. 5).

Заключение

Разработаны основы технологии массового изготовления чипов с трубчатыми зондами для СТМ из гетероструктур $\text{InP}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$. Технология базируется на методах самосворачивания тонких напряженных гетеропленок в трубки и методах, используемых в технологии изготовления интегральных схем. Впервые изготовлены микротрубки из гетеропленок $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ с использованием селективного анизотропного травления подложки InP. Изготовлены чипы с трубчатыми зондами, выступающими за края чипов. Продемонстрировано, что с помощью изготовленных туннельных зондов возможно получение СТМ-изображения поверхности графита с псевдоатомным разрешением на воздухе.

В данной статье мы ограничились рассмотрением наиболее простого случая формирования трубок из гетеропленки $\text{In}_{0,64}\text{Ga}_{0,36}\text{As}/\text{In}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{As}$. Молекулярно-лучевой эпитаксией можно вырастить более сложные многослойные гетеропленки, из которых будут сформированы зонды. Задавая материалы слоев, толщину гетеропленок и уровень легирования, можно управлять зонной структурой трубчатых зондов, что расширяет возможности их применения в высоковакуумной сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии, спиновой туннельной микроскопии и микроскопии ближнего поля.

Авторы выражают благодарность канд. физ.-мат. наук М. А. Путько за выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктуры.

Работа поддержана государственным контрактом № 02.512.11.2218 от 4 июля 2008 г.

Список литературы

1. **Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., and Weibel E.** Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy // *Phys. Rev. Lett.* 1982. V. 49. P. 57–61.
2. **Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch. and Weibel E.** 7×7 Reconstruction on Si(111) Resolved in Real Space // *Phys. Rev. Lett.* 1983. V. 50. P. 120–123.
3. **Lang N. D.** Apparent barrier height in scanning tunneling microscopy // *Phys. Rev. B.* 1982. V. 37. P. 10395.
4. **Weimer M., Kramar J., and Baldeshwieler J. D.** Band bending and the apparent barrier height in scanning tunneling microscopy // *Phys. Rev. B.* 1989. V. 39. N 8. P. 5572.
5. **Feenstra R. M.** Tunneling spectroscopy of the (110) surface of direct-gap III–V semiconductors // *Phys. Rev. B.* 1994. V. 50. P. 4561.
6. **Sutter P., Zahl P., Sutter E., and Bernard J. E.** Energy-Filtered Scanning Tunneling Microscopy using a Semiconductor Tip // *Phys. Rev. Lett.* 2003. V. 90. P. 166101-1.
7. **Mizuno M., Kim E. H.** High-resolution energy-filtered scanning tunneling microscopy using doped one-dimensional semiconductors // *Phys. Rev. B.* 2008. V. 77. P. 085418-1.
8. **Prins M. W. J., Jansen R., and van Kempen H.** Spin-polarized tunneling with GaAs tips in scanning tunneling microscopy // *Phys. Rev. B.* 1996. V. 53. P. 8105–8113.
9. **Grafström S.** Photoassisted scanning tunneling microscopy // *J. Appl. Phys.* 2002. V. 91. N 4. P. 1717–1753.
10. **Yamaguchi K. and Tada S.** Fabrication of GaAs Microtips for Scanning Tunneling Microscopy by Wet Etching // *J. Electrochem. Soc.* 1996. V. 143. N 8. P. 2616.
11. **Prinz V. Ya., Seleznev V. A., Samoylov V. A., Gutakovsky A. K.** *Microelectronic Engineering.* 1996. V. 30. P. 439.
12. **Prinz V. Ya., Seliznev V. A., Gutakovsky A. K.** Self-formed InGaAs/GaAs Nanotubes: Concept, Fabrication, Properties // *Proceedings of the 24th International Conference on the Physics of Semiconductors, Jerusalem, Israel, August 2–7, 1998, World Scientific.*
13. **Prinz V. Ya., Seleznev V. A., Gutakovsky A. K., Chekhovskiy A. V., Preobrazhenskii V. V., Putyato M. A., and Gavriloya T. A.** Free-standing and overgrown In-GaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays // *Physica E; Low-dimensional Systems and Nanostructures.* 2000. V. 6. P. 829–831.
14. **Golod S. V., Prinz V. Ya., Mashanov V. I., and Gutakovsky A. K.** Fabrication of conducting GeSi/Si micro- and nanotubes and helical microcoils // *Semiconductor Science and Technology.* 2001. V. 16. P. 181–185.
15. **Nastaushev Y. V., Prinz V. Ya., Svitashva S. N.** A technique for fabricating Au/Ti micro and nanotubes // *Nanotechnology.* 2005. V. 16. P. 908–912.
16. **Принц В. Я., Селезнев В. А., Чеховский А. В.** Самоформирующиеся полупроводниковые микро- и нанотрубки // *Микросистемная техника,* 2003. № 6. С. 29–34.
17. **Mei Y., Huang G., Solovev A. A., Urena E. B., Moench I., Ding F., Reindl T., Fu R. K. Y., Chu P. K., Schmidt O. G.** Versatile Approach for Integrative and Functionalized Tubes by Strain Engineering of Nanomembranes on Polymers // *Advanced Materials.* 2008. V. 20. N 21. P. 4085–4090.
18. **Strelow Ch., Sauer M., Fehring S., Korn T., Schuller C., Stemmann A., Heyn Ch., Heitmann D., Kipp T.** Time-Resolved Studies of a Rolled-Up Semiconductor Microtube Laser, <http://arxiv.org/abs/0911.0761v1>.
19. **Li F., Mi Z.** Optically pumped rolled-up InGaAs/GaAs quantum dot microtube lasers // *OPTICS EXPRESS.* 2009. V. 17. N 22. P. 19933.
20. **Селезнев В. А., Принц В. Я.** Способ изготовления датчика скорости потока газа и жидкости. Патент на изобретение № 2353998 (заявка № 2007129547 от 1.08.2007), опубликовано: 27.04.2009 Бюл. № 12.
21. **Селезнев В. А., Принц В. Я., Анискин В. М., Маслов А. А.** Генерация и регистрация возмущений в потоке газа 1. Формирование массивов микротрубчатых нагревателей и сенсоров // *ПМТФ.* 2009. Т. 50. № 2. С. 145–151.
22. **Шиплюк А. Н., Анискин В. М., Селезнев В. А., Принц В. Я., Маслов А. А., Матвиенко Р. С.** Генерация и регистрация возмущений в потоке газа 2. Эксперименты с массивами микротрубчатых нагревателей и сенсоров // *ПМТФ.* 2009. Т. 50. № 3. С. 112–117.
23. **Prinz V. Ya., Seleznev V. A., Prinz A. V., Kopylov A. V.** 3D heterostructures and systems for novel MEMS/NEMS, *Sci. Technol // Advanced Materials.* 2009. V. 10. P. 034502.
24. **Zhang Li, Abbott J. J., Dong L., Kratochvil B. E., Bell D., Nelson B. J.** Artificial bacterial flagella: Fabrication and magnetic control // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 94. P. 064107.
25. **Naumova E. V., Prinz V. Ya., Golod S. V., Seleznev V. A., Soots R. A., Kubarev V. V.** Manufacturing chiral electromagnetic metamaterials by directional rolling of strained heterofilms // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics.* 2009. V. 11. N 7. P. 074010.
26. **Принц А. В., Селезнев В. А., Принц В. Я.** Микроигла в интегральном исполнении и способ ее изготовления. Патент № 2179458 по заявке № 99111533 от 1 июня 1999 г. Решение о выдаче патента от 20.09.2001.
27. **Prinz V. Ya., Prinz A. V., Seleznev V. A.** Semiconductor micro- and nanoneedles for microinjection and ink-jet printing // *Microelectronic Engineering.* 2003. V. 67–68. P. 782–788.
28. **Prinz A. V., and Prinz V. Ya.** Application of semiconductor micro- and nanotubes in biology // *Surface Science.* 2003. V. 911. P. 532–535.
29. **Golod S. V., Prinz V. Ya., Mashanov V. I.** Directional-rolling method for strained SiGe/Si films and its application to fabrication of hollow needles // *Thin Solid Films,* 2005. V. 489. N 1–2. P. 169–176.
30. **Принц В. Я., Голод С. В., Принц А. В.** Полая наноигла в интегральном исполнении и способ ее изготовления. Патент РФ № 2341299, 2008.
31. **Принц В. Я., Голод С. В.** Упругие нанооболочки на основе кремниевых пленок: формирование, свойства и практическое применение // *Прикладная механика и техническая физика.* 2006. Т. 47. № 6. С. 114–128.
32. **Hjort K.** Sacrificial etching of III–V compounds for micromechanical devices // *J. Micromech. Microeng.* 1996. V. 6. P. 370–375.
33. **Seassal C., Leclercq J. L., Viktorovich P.** Fabrication of InP-based freestanding microstructures by selective surface micromachining // *J. Micromech. Microeng.* 1996. V. 6. P. 261–265.
34. **Elias P., Kostic I., Soltys J., Hasenohrl S.** Wet-etch bulk micromachining of (100) InP substrates // *J. Micromech. Microeng.* 2004. V. 14. P. 1205–1214.
35. **Matine N., Dvorak M. W., Pelouard J. L., Pardo F., Bolognesi C. R., Fraser S.** InP in HBTs by vertical and lateral wet etching // *Proceeding of the International Conference on Indium Phosphide and Related Materials.* 1998. P. 195–198.
36. **Seleznev V. A., Yamaguchi H., Hirayama Y., Prinz V. Ya.** Single-turn GaAs/InAs nanotubes fabricated using the supercritical CO₂ drying technique, *Jpn // J. Appl. Phys.* 2003. V. 42. N 7A. P. L791–L794.

УДК 621.391.26

Н. А. Гирфанова, инженер, ООО НПК "Сенсорис",
аспирант ФГУП "НИИФП
им. Ф. В. Лукина"
e-mail: natalia_girfanova@hotmail.ru

ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ В ПАССИВНЫХ СИСТЕМАХ АВТОФОКУСИРОВКИ

Проведен анализ ряда алгоритмов вычисления параметра, характеризующего качество изображения в пассивных системах автофокусировки, а именно — дискретное вейвлет-преобразование, дискретное косинусное преобразование, одномерный и двумерный градиент. Для части методов используется предварительная фильтрация. Проведены эксперименты с набором видеоданных, представляющих собой наиболее сложные ситуации автофокусировки. Выполнена оценка аппаратных затрат при реализации блока вычисления параметра в интегральной схеме по технологии КМОП 0,18 мкм.

Ключевые слова: системы пассивной автофокусировки, резкость изображения

Введение

Скорость и точность автофокусировки являются важнейшими параметрами видеокамеры. По принципу работы различают активные и пассивные системы автофокусировки.

Системы пассивной автофокусировки используются главным образом в видеокамерах, в том числе в веб-камерах и камерах наблюдения. Принцип их действия основан на анализе параметра, характеризующего качество изображения. Положение фокусирующего объектива, при котором значение этого параметра максимальное, и является оптимальным положением фокусировки. В качестве параметра могут рассматриваться градиент, коэффициенты пространственных частот, полученные при проведении над изображением дискретного косинусного преобразования (ДКП) или дискретного вейвлет-преобразования (ДВП). По сравнению с активными системами автофокусировки, которые могут работать при плохом освещении, так как используют дальномеры

для определения расстояния до снимаемого объекта, при работе систем пассивной автофокусировки требуется достаточный уровень освещенности. Кроме того, при одном цикле автофокусировки пассивной системы задействована полностью схема обработки изображения, включая захват и фильтрацию, что значительно увеличивает потребляемую мощность устройства [1]. Преимущество пассивных систем заключается в том, что они могут работать через прозрачные преграды, например стекло. Кроме того, для реализации пассивной системы не требуются дополнительные внешние элементы — дальномеры и детекторы. В данной статье проводится сравнение ряда методов с точки зрения их точности и требуемых аппаратных затрат.

Методы вычисления параметра, характеризующего качество изображения

К методам вычисления параметра, характеризующего качество изображения, выдвигаются три основных требования [2]:

- используемые алгоритмы должны позволять работать с различными изображениями;
- алгоритм должен быть точным, а именно — положение объектива, при котором значение вычисляемого параметра максимально, должно соответствовать положению фокуса;
- при реализации алгоритма в интегральной микросхеме требуемые аппаратные затраты должны быть минимальными.

Для всех алгоритмов, за исключением ДКП и ДВП, параметр, характеризующий качество изображения, вычисляется по формуле

$$P = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} G_{i,j} \quad (1)$$

где $G_{(i,j)}$ — значение параметра, характеризующего качество изображения в точке с координатами (i,j) ; $n \times n$ — размер в пикселях области, по которой происходит оценка качества изображения. В данной статье для всех алгоритмов вычисления параметра рассматривается область размером 64×64 пикселя. Назовем этот участок областью фокусировки.

Ниже рассмотрены методы вычисления параметра, характеризующего качество изображения.

Алгоритм Собеля. Алгоритм Собеля вычисляет двумерное пространственное значение градиента для определения резких границ на изображении.

Как правило, используются восемь отсчетов интенсивности в окрестностях центральной точки:

$$G_{x(i,j)} = [A_{(i-1,j-1)} + 2A_{(i-1,j)} + A_{(i-1,j+1)}] - [A_{(i+1,j-1)} + 2A_{(i+1,j)} + A_{(i+1,j+1)}]; \quad (2)$$

$$G_{y(i,j)} = [A_{(i-1,j-1)} + 2A_{(i,j-1)} + A_{(i+1,j-1)}] - [A_{(i-1,j+1)} + 2A_{(i,j+1)} + A_{(i+1,j+1)}], \quad (3)$$

где $G_{x(i,j)}$ — составляющая значения параметра, характеризующего качество изображения по оси абсцисс; $G_{y(i,j)}$ — составляющая значения параметра, характеризующего качество изображения по оси ординат; A — интенсивность в точке с указанными координатами.

Двумерное значение параметра, характеризующее качество изображения, в точке с координатами i, j вычисляем следующим образом:

$$G_{(i,j)} = \sqrt{G_{x_{i,j}}^2 + G_{y_{i,j}}^2} \quad (4)$$

или для снижения аппаратных затрат используем следующую формулу:

$$G_{(i,j)} = |G_{x_{(i,j)}} + G_{y_{(i,j)}}|. \quad (5)$$

Алгоритм Собеля позволяет выполнить двумерное пространственное вычисление градиента. Как правило, видеоданные поступают построчно, следовательно, для реализации данного алгоритма требуется память или регистры хранения данных минимум на две строки. Так как считывание данных с матрицы происходит построчно, необходимо считать и записать данные двух строк и использовать считываемые данные третьей строки для вычисления значения градиента по восьми отсчетам в окрестности центральной точки.

Одномерный градиент. При вычислении одномерного градиента как параметра, характеризующего качество изображения, не требуется наличие аппаратной памяти.

Одномерный градиент в точке вычисляется следующим образом:

$$G_{(i,j)} = (A_{(i,j)} - A_{(i-1,j)})/2. \quad (6)$$

Цифровое изображение содержит шумы, связанные с несовершенством устройств съемки, а также с внешними условиями. Методы вычисления одномерного градиента особенно чувствительны к этим шумам. Предварительная фильтрация изображения позволяет снизить уровень шума, а также избавиться от дефектных пикселей.

Медианный фильтр

Медианный фильтр представляет собой оконный фильтр, последовательно скользящий по массиву сигнала и возвращающий на каждом шаге один из элементов, попавших в окно (апертуру) фильтра.

В целях минимизации аппаратных затрат окно для выполнения медианной фильтрации одномерное. Медианная фильтрация осуществляет замену значений отсчетов в центре апертуры медианным

значением исходных отсчетов внутри апертуры фильтра. При проведении экспериментов использовали одномерное окно размером 4 пикселя.

Вычисляем градиент в точке:

$$G = (A_{m(i,j)} - A_{m(i-1,j)})/2, \quad (7)$$

где A_m — значение интенсивности в точке с указанными координатами после выполнения медианной фильтрации.

Скользящее среднее. Результатом фильтрации является значение математического ожидания (градиента), вычисленное по всем пикселям окна. Математически это эквивалентно свертке с маской, все элементы которой равны $1/M$, где M — число элементов маски. Используем одномерное окно для вычисления скользящего среднего.

При проведении экспериментов использовали одномерную маску с числом элементов $M = 4$.

$$A_s = 1/M \sum_{i=0}^M A_i, \quad (8)$$

где A_s — значение интенсивности в точке после вычисления скользящего среднего. Далее вычисляем градиент:

$$G_{i,j} = (A_{s(i,j)} - A_{s(i-1,j)})/2.$$

Фильтр Гаусса. Эффективное подавление шумов можно осуществить, если влияние числа пикселей на результат будет уменьшаться с увеличением расстояния от обрабатываемого пикселя. Этим свойством обладает гауссовский фильтр с ядром:

$$h_{(i,j)} = (1/2\pi\sigma^2)\exp(-(i^2 + j^2)/2\sigma^2), \quad (9)$$

где σ — среднеквадратическое отклонение распределения Гаусса.

Гауссовский фильтр имеет ненулевое ядро бесконечного размера. Однако значение ядра фильтра очень быстро стремится к нулю при удалении от точки $(0, 0)$, и поэтому на практике можно ограничиться сверткой с окном небольшого размера вокруг $(0, 0)$, например, взяв радиус окна равным 3σ .

Гауссовская фильтрация также является сглаживающей. Степень размытия изображений определяется параметром σ .

После выполнения фильтрации также вычисляем градиент

$$G_{(i,j)} = (A_{h(i,j)} - A_{h(i-1,j)})/2, \quad (10)$$

где A_{h_n} , $A_{h_{n-1}}$ — значения интенсивности в точке после проведения фильтрации Гаусса.

Дискретное косинусное преобразование. Для выполнения ДКП область, по которой выполняется вычисление параметра, характеризующего качество изображения, разбивается на участки размером 8×8 пикселей. Значения коэффициентов ДКП можно рассматривать как относительные величины вкладов двумерных пространственных частот,

содержащихся в исходном 64-битном изображении [3]:

$$F(u, v) = c(u)c(v) \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} [P(i, j) \cos((2i+1) \times (\pi/2n)) \cos((2j+1)(v\pi/2n))], \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} c(u) &= 1/\sqrt{2} \text{ при } u = 0; \\ c(u) &= 1 \text{ при } u = 1, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (12)$$

и аналогично для $c(v)$.

Параметр, характеризующий качество изображения, вычисляем как сумму коэффициентов всех пространственных частот, за исключением постоянной составляющей:

$$P = \sum_{u=0}^{u=n} \sum_{v=0}^{v=n} F(u, v)^2.$$

Дискретное вейвлет-преобразование. Проведение дискретного двумерного вейвлет-преобразования над входным изображением позволяет получить матрицу коэффициентов соответствующих пространственных частот. Для этого для каждой строки выполняется одномерное преобразование, представляющее собой низкочастотную и высокочастотную фильтрацию данных. Затем над результатами преобразования для каждого из столбцов выполняются аналогичные преобразования.

Таким образом, входной сигнал преобразуется в набор двумерных Sub-band сигналов, представляющих интенсивность сигнала в различных полосах частот, в различных пространственных областях. Под Sub-band понимают набор коэффициентов, полученных с помощью одной и той же последовательности низкочастотных и высокочастотных фильтрующих операций по горизонтали и вертикали. Sub-bands обозначаются следующим образом: LL, HL, LH или HH.

В качестве параметра, характеризующего качество изображения, рассматриваем сумму взятых по модулю коэффициентов высоких пространствен-

ных частот — Sub-band HH, HL, LH. При этом коэффициенты в Sub-band HL являются коэффициентами преобразования, полученными низкочастотной фильтрацией по вертикали и высокочастотной фильтрацией по горизонтали; коэффициенты в Sub-band LH являются коэффициентами преобразования, полученными высокочастотной фильтрацией по вертикали и низкочастотной фильтрацией по горизонтали; коэффициенты в Sub-band HH являются коэффициентами преобразования, полученными высокочастотной фильтрацией по вертикали и высокочастотной фильтрацией по горизонтали.

Экспериментальная оценка точности методов вычисления параметра, характеризующего качество изображения

Проведено исследование точности различных методов вычисления параметра, характеризующего качество изображения.

Предварительно был определен номер кадра, которому соответствует максимальное значение параметра, характеризующего качество изображения.

Область, в которой снимаемое изображение находится в фокусе, определялась по методу экспертных оценок. Область измеряется в кадрах видеоряда и называется областью фокусировки.

При попадании кадра, соответствующего максимальному значению параметра, в область фокусировки считаем, что метод подходит для вычисления параметра в видеорядах данного типа.

При исследовании проводился анализ видеорядов, представляющих собой большинство сложных ситуаций (табл. 1).

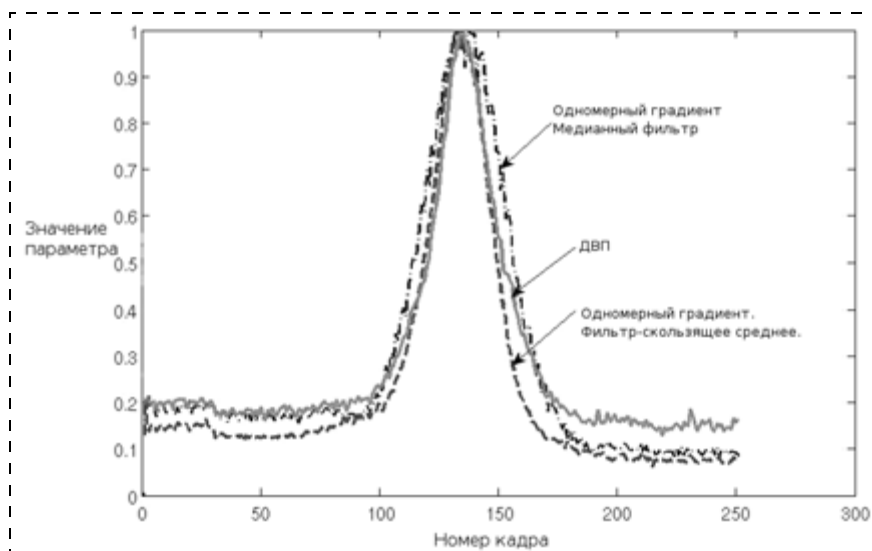
На рисунке приведены зависимости параметра, характеризующего качество изображения, от положения фокусирующего объектива при съемке тестового изображения, содержащего окружность, разделенную на чередующиеся черные и белые секторы. Приведены результаты исследования для следующих методов вычисления параметра: ДВП, одномерный градиент с применением фильтра скользящее сред-

Таблица № 1

Оценка точности методов вычисления параметра, характеризующего качество изображения при анализе видеорядов различных типов

Видеоряд	ДКП	Алгоритм Собеля	Одномерный градиент + фильтр Гаусса	Одномерный градиент	Одномерный градиент + медианный фильтр	Одномерный градиент + скользящее среднее	ДВП
Контрастное изображение	+	+	—	—	+	—	+
Шахматное изображение	+	+	+	+	+	+	+
Горизонтальные линии	+	+	+	+	+	+	+
Несколько объектов	+	+	+	+	—	+	+
Низкоконтрастное изображение	+	+	+	—	+	—	+
Текст	+	+	+	—	+	+	+
Вертикальные линии	+	+	+	+	+	+	+
Тестовое изображение	+	+	+	+	+	+	+
Пейзаж	+	+	+	+	+	+	+

+ кадр, соответствующий максимальному значению параметра, входит в зону фокусировки; — кадр, соответствующий максимальному значению параметра, не входит в зону фокусировки.



Зависимости параметра, характеризующего качество изображения, от положения фокусирующего объектива при съемке тестового изображения

нее, одномерный градиент с применением медианного фильтра.

Методом экспертных оценок определено, что номер кадра, при котором изображение в фокусе, — 127.

В результате наиболее точные методы вычисления параметра, характеризующего качество изображения, — это ДВП, ДКП и алгоритм Собеля.

Это объяснимо с той точки зрения, что методы используют двумерную обработку изображения, позволяющую точно вычислять соответствующие значения коэффициентов пространственных частот, а также значение градиента в случае использования алгоритма Собеля.

Метод вычисления одномерного градиента с предварительной медианной фильтрацией, а также с применением фильтра Гаусса имеют по одному неверному результату. Медианные фильтры при оптимально выбранной апертуре могут сохранять без искажений резкие границы объектов, при этом эффективно подавляя некоррелированные или слабо коррелированные помехи и малоразмерные детали.

Таблица № 2

Оценка аппаратных затрат для различных методов вычисления параметра, характеризующего качество изображения

Метод	0.18CMOS (вентиля)	Память, бит	Площадь памяти на кристалле
Одномерный градиент	5612	Не требуется	Не требуется
Одномерный градиент + скользящее среднее	6024	64	Не требуется
Одномерный градиент + медианный фильтр	8418	Не требуется	Не требуется
Алгоритм Собеля	8919	3072	21 016 мкм ²
Одномерный градиент + фильтр Гаусса	24 962	Не требуется	Не требуется
ДВП	38 031	1920	19 738 мкм ²
ДКП	66 815	1024	18 496 мкм ²

Фильтрация Гаусса также является сглаживающей. Некоторая неточность методов объясняется тем, что мы вычисляем и используем значение градиента только по составляющей абсцисс.

Одномерный градиент с предварительным вычислением скользящего среднего неверен в двух случаях. Фильтр скользящего среднего в большей степени сглаживает резкие границы и контуры и в меньшей степени подавляет шумовые составляющие.

Наименее корректный метод — это вычисление одномерного градиента без предварительной фильтрации. Это объясняется тем, что используется только одномерная составляющая перепадов интенсивности и, кроме того, вследствие отсутствия предварительной филь-

трации помехи дефектные пиксели матрицы отрицательно влияют на результат вычисления параметра, характеризующего качество изображения.

Оценка аппаратных затрат

При оценке аппаратных затрат учитывался ряд аспектов системы автофокусировки (табл. 2). Прежде всего — требуемые объемы памяти. При реализации таких алгоритмов, как ДКП или ДВП, наличие памяти обязательно, но память не требуется для реализации алгоритмов вычисления градиента.

Далее, в качестве наиболее аппаратно затратных элементов рассматривались умножители, сумматоры и сдвиговые регистры. Так как реализация различных конвейерных структур вносит наибольший вклад в аппаратные затраты, понятно, что в зависимости от требуемой частоты аппаратная емкость этих элементов может различаться.

На количество используемых технических средств влияет также область кадра, по которой происходит автофокусировка. Соответствующие каждому пикселю значения градиентов или коэффициентов высоких и низких пространственных частот хранятся либо в памяти, либо в специально отведенных регистрах. Все описанные в статье эксперименты проводились для участка изображения размером 64 × 64 пикселя. Следовательно, при уменьшении или увеличении анализируемой области изображения соответствующие аппаратные затраты будут изменяться пропорционально.

Предполагаем, что схема управления не вносит ощутимого вклада.

Выводы

В статье рассмотрены следующие методы вычисления параметра, характеризующего качество изображения: ДВП, ДКТ, методы вычисления одномерного градиента с применением различных фильтров.

Были проведены эксперименты с рядами видеоданных, представляющих собой наиболее сложные ситуации с точки зрения автофокусировки.

В результате получено, что такие методы, как ДВП и ДКТ, обеспечивают точное вычисление параметра, характеризующего качество изображения при всех видах рассмотренных видеоданных. С точки зрения аппаратуры это наиболее затратные методы. Для реализации в интегральной схеме ДВП по технологии 0,18 мкм с одним уровнем декомпозиции требуется около 40 тыс. вентиляей, а также объем памяти 1920 бит. Для реализации ДКТ необходимо около 67 тыс. вентиляей и объем памяти 1024 бит.

Наименее затратный метод — это одномерный градиент (5,5 тыс. вентиляей). Но данный метод не позволяет правильно вычислить параметр более чем в 30 % случаев.

Одномерный градиент с предварительным использованием медианного фильтра позволяет точно определить параметр, характеризующий качество изображения в 90 % случаев, при этом аппаратная

реализация не требует использования памяти, а число вентиляей составляет 8,5 тыс.

Аппаратные затраты важны при реализации системы автофокусирования непосредственно на одном кристалле с сенсором и блоками обработки изображения. Результаты этого исследования могут быть использованы при разработке компактных видео- и веб-камер.

Список литературы

1. Yeh T., Sampat N., Venkataraman S., Kremens R. System implications of implementing Auto-Focus on consumer digital cameras // Conference on Image Processing, Image Quality and Image Capture Systems (PICS-99), Savannah, Georgia, USA, April 25—28. 1999.
2. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Князь В. А., Ходаков А. Н., Моржин А. В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW и IMAQ Vision. М.: ДМК Пресс, 2007.
3. Давыдов А. В. Цифровая обработка сигналов: Тематические лекции. Екатеринбург: Изд. Уральского гос. горного универ., 2007.

УДК 621.382:53

В. А. Гридчин, д-р техн. наук, проф.,
О. В. Лобач, ст. преподаватель,
Р. П. Дикарева, ст. преподаватель,
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Новосибирский государственный технический
университет"
e-mail: v.gridchin@amber.ref.nstu.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО СЕНСОРА ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Представлены упрощенная тепловая и конечно-элементная модели микроэлектронного сенсора теплового потока, обсуждены особенности конструкции. Определено тепловое сопротивление и получены выражения для выходного сигнала сенсора. Показано, что численное моделирование точнее описывает характеристики по сравнению с аналитической моделью. Проведено сравнение модельных расчетов с экспериментальными данными, которое подтвердило правильность моделей. Предложенная численная модель позволяет проводить оптимизацию характеристик сенсора.

Ключевые слова: сенсор, тепловой поток, микроэлектронная технология, метод конечных элементов

Введение

Измерение тепловых потоков имеет важное практическое значение в строительстве, климатических исследованиях и медицинских приложениях [1—3]. В настоящее время особый интерес вызывают микроэлектронные сенсоры теплового потока, изготовленные с применением технологии микросистемной

техники, вследствие высокой чувствительности, малых размеров и совместимости с интегральной электроникой. Эта технология ранее применялась для создания сенсоров, регистрирующих поток электромагнитного излучения (например лазерного) [4—6].

Однако применение микроэлектронных структур для измерения потока при переносе теплоты кондукцией требует специального рассмотрения ввиду особенностей конструкции сенсора и требований методики измерений. Ранее нами был предложен такой сенсор, описаны некоторые его характеристики и построена простейшая модель [7—9]. В данной работе приведена конечно-элементная модель микроэлектронного сенсора и проведено ее сравнение с простой моделью [9] и экспериментальными данными.

Принцип действия и конструкция сенсора

В стандартных конструкциях сенсоров тепловой поток проходит через плоскую пластину из полимера или резины, внутри которой находятся металлические термодпары, ориентированные по нормали к горячей и холодной поверхностям [10]. Возникающий градиент температуры преобразуется в электрический сигнал. Основной недостаток таких сенсоров — низкая чувствительность, что связано с малостью коэффициента термоЭДС металлов.

В рассматриваемом сенсоре теплового потока главной частью является профилированная кремниевая мембрана с термодпарами "поликристаллический кремний—алюминий". Так как коэффициент термоЭДС полупроводников значительно выше, чем у металлов, то можно резко увеличить чувствительность сенсоров. Принципиальным отличием микроэлектронных сенсоров теплового потока от обычных является коллинеарность теплового потока поверх-

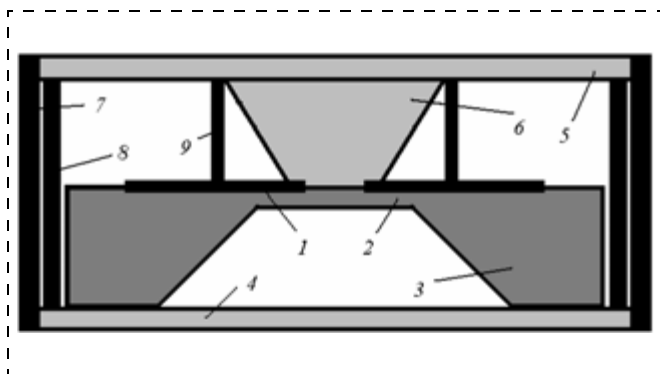


Рис. 1. Конструкция микроэлектронного сенсора теплового потока:

1 — термopары; 2 — кремниевая мембрана; 3 — кремниевая рамка; 4 — холодная крышка; 5 — горячая крышка; 6 — теплопровод; 7, 8, 9 — теплоизоляционные кольца

ности, на которой расположены термopары. Это приводит к базовой конструкции сенсора, представленной на рис. 1.

Горячая (5) и холодная (4) крышки служат не только для выравнивания температуры, но и для защиты от механических повреждений. Ключевой особенностью конструкции сенсора является наличие теплопровода 6, позволяющего подводить измеряемый тепловой поток в центральную часть кремниевой мембраны. Эта деталь отсутствует в сенсорах, предназначенных для регистрации излучения. Мембрана 2 имеет квадратную форму и, изменяя ее толщину, можно управлять чувствительностью сенсора. Термopары 1 располагаются радиально на поверхности, а их холодные спаи находятся на толстой части (рамке) профилированной мембраны. Механическая жесткость и тепловая развязка крышек обеспечивается теплоизолирующими кольцами 7, 8, 9.

Электрический сигнал сенсора формируется под влиянием перепада температуры ΔT_4 на мембране, который меньше, чем перепад температуры между горячей и холодной крышками.

Упрощенная тепловая модель сенсора

В упрощенной модели распределение температуры в сенсоре описывается с помощью тепловых сопротивлений (ТС), объединенных в схему в соответствии с конструкцией.

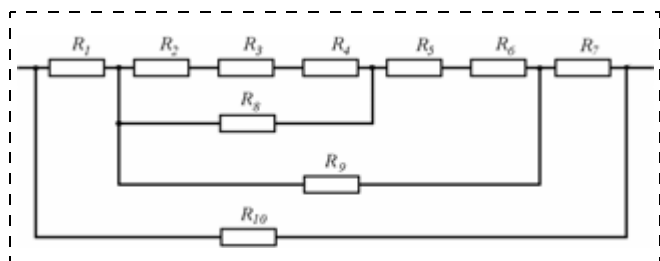


Рис. 2. Упрощенная тепловая модель сенсора:

R_1, R_7 — тепловые сопротивления (ТС) горячей и холодной крышек; R_2-R_6 — ТС теплопровода (R_2), контакта теплопровода и мембраны (R_3), тонкой части мембраны с термopарами (R_4), толстой части мембраны (рамка) (R_5), контакта рамки мембраны — холодной крышка (R_6); R_8, R_9, R_{10} — сопротивления тепловой изоляции сенсора

ствии с конструкцией. Применительно к рис. 1 эта схема имеет вид, приведенный на рис. 2.

В этой модели пренебрегается конвекционной составляющей теплообмена ввиду малости перегревов элементов сенсора и особенностей его геометрии, а также предполагается изотермичность интерфейсных поверхностей. Достоверность последнего упрощения можно проверить численным моделированием.

Тепловое сопротивление отдельных элементов конструкции сенсора определяется их геометрией и теплопроводностью материалов.

Для квадратной мембраны ТС не имеет простого аналитического выражения. Приближенно его можно принять равным ТС мембраны круглой формы, вписанной в квадрат и имеющей ту же толщину, что и квадратная мембрана:

$$R_4 = \frac{1}{2\pi\lambda h_4} \ln \frac{r_1}{r_2}, \quad (1)$$

где r_2 — наружный радиус мембраны; r_1 — радиус теплопровода в месте касания мембраны; h_4 — толщина; λ — теплопроводность мембраны.

Для теплопровода в форме усеченного кругового конуса ТС определяется выражением

$$R_2 = \frac{1}{2\pi r_0^2} \frac{r_0 h}{r_1},$$

где r_0 и h — соответственно радиус основания и высота теплопровода.

Остальные элементы сенсора имеют форму дисков, колец, квадратной рамки, ТС которых определяется стандартным образом [11, 12].

Общее тепловое сопротивление сенсора, соответствующее схеме рис. 2, равно

$$R_0 = \frac{R_{10}(R_{\Sigma 2} + R_1 + R_7)}{R_{10} + R_{\Sigma 2} + R_1 + R_7}, \quad (2)$$

где $R_{\Sigma 1} = \frac{R_8(R_4 + R_3 + R_2)}{R_8 + R_4 + R_3 + R_2}$, $R_{\Sigma 2} = \frac{R_9(R_{\Sigma 1} + R_5 + R_6)}{R_9 + R_{\Sigma 1} + R_5 + R_6}$.

Оно определяет общий перепад температуры ΔT между горячей и холодной крышками сенсора. Разность температуры горячего и холодного концов термopары ΔT_4 , определяющая ее выходной сигнал, оказывается в k раз меньше

$$k = \frac{\Delta T_4}{\Delta T} = \frac{R_{\Sigma 2} R_{\Sigma 1} R_4}{(R_1 + R_{\Sigma 2} + R_7)(R_{\Sigma 1} + R_5 + R_6)(R_2 + R_3 + R_4)}. \quad (3)$$

Если сенсор содержит N одинаково расположенных термopар, имеющих коэффициент термоЭДС α и соединенных последовательно в термобатарею, то выходной сигнал сенсора оказывается равен

$$U = N\alpha k R_0 S q = \gamma q, \quad (4)$$

где S — площадь крышки; q — плотность теплового потока и γ — чувствительность сенсора.

Конечно-элементная модель

Более точно характеристики теплового сенсора описывает конечно-элементная модель, которая включает все элементы сенсора. Расчеты распределения температур были выполнены с применением пакета ANSYS (версия 11). Симметрия сенсора позволяет в ходе расчетов оперировать с его четвертой частью. При моделировании использовали смешанные граничные условия — температуру "холодной" крышки принимали равной нулю, а на "горячую" крышку поступал равномерно распределенный тепловой поток $P_0 = \text{const}$.

При моделировании применяли упорядоченную сетку, образованную двадцатиточечными элементами Solid90. Плотность сетки варьировали в зависимости от требуемой точности счета — на мембране она была выше, чем на крышках. На рис. 3 (см. вторую сторону обложки) представлена схема сенсора с сеткой разбиения при конечно-элементном моделировании, в которой для ясности убраны два теплоизолирующих кольца.

При численных расчетах принималось, что профилированная мембрана имеет наружные размеры $10 \times 10 \times 0,5$ мм, а ее квадратная тонкая часть — $5 \times 5 \times 0,015$ мм. Форма и размеры сечения мембраны определялись спецификой травления в КОН. Латунные крышки имели диаметр $D = 31$ мм, а общая толщина сенсора составляла 14 мм.

Обсуждение полученных результатов

Численное моделирование демонстрирует сложную структуру температурного поля сенсора. Особое значение имеет распределение температуры по мембране, поскольку оно определяет топологию термопар и влияет на чувствительность сенсора. На рис. 4 это распределение представлено в относительных единицах по поверхности мембраны в двух случаях: параллельно стороне квадрата через его центр и вдоль диагонали.

Распределение температуры имеет нелинейный характер. Анизотропия несущественна в центральной части мембраны (область теплопровода), где изотермы имеют круглую форму, и заметна в периферийной части, где форма изотерм приближается к квадратной.

При выбранных размерах теплопровода ($r_1 = 1$ мм) и стороны мембраны ($2a = 5$ мм) моделирование показывает очень слабую неизотермичность рамки мембраны:

$$\frac{\Delta T_p}{T(0)} < 3,5 \cdot 10^{-6},$$

где ΔT_p — максимальный перепад температуры по рамке; $T(0)$ — максимальная температура в центре мембраны.

Вследствие неоднородного распределения температуры по мембране ее тепловое сопротивление оказывается зависящим от координат. Для сопоставления сенсоров с мембранами различных размеров це-

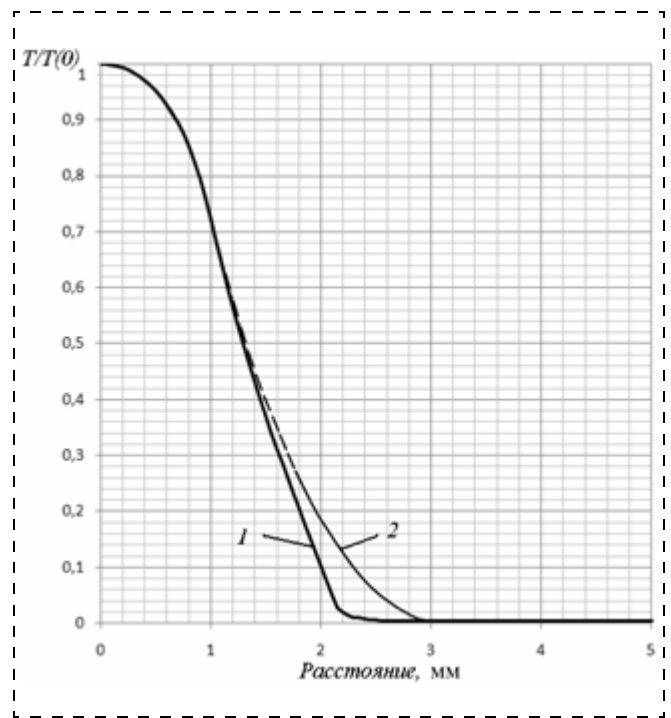


Рис. 4. Распределение температуры на поверхности мембраны:
1 — параллельно стороне квадрата через его центр; 2 — вдоль диагонали

лесообразно определять тепловое сопротивление мембраны соотношением

$$T(0) - T_p = R_m P, \quad (5)$$

где P — тепловой поток, T_p — температура рамки; R_m — радиус мембраны.

Горячие концы термопар размещаются в разных точках мембраны и имеют различную температуру $T_i(x, y)$. Эффективность топологического решения по размещению термопар определяется параметром ϕ , $0 \leq \phi \leq 1$:

$$\phi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{T_i(x, y) - T_p}{T(0) - T_p}, \quad (6)$$

представляющим (в относительных единицах) средний перепад температуры на батарее из N термопар.

Конечно-элементное моделирование показывает также, что поверхность горячей крышки не является изотермической: у краев крышки температура выше, чем в центре.

Разница температур, однако, не превышает $\delta = \Delta T / T_k(0) = 5 \cdot 10^{-4}$, где $T_k(0)$ — температура центра горячей крышки. Пренебрегая этой разницей, можно ввести тепловое сопротивление R_0 всего сенсора обычным образом

$$T_{ГК} - T_{ХК} = R_0 S q, \quad (7)$$

где S — площадь крышки; q — плотность теплового потока; $T_{ГК}$, $T_{ХК}$ — температура горячей и холодной крышки соответственно.

С учетом сказанного выше выходной сигнал сенсора, содержащего батарею из N термопар, определяется следующим произведением:

$$U = N\alpha k R_0 S \varphi q = \beta q, \quad (8)$$

где $k = R_M/R_0$, R_M определяется из соотношения (5); β — чувствительность сенсора. Максимизируя k и φ , можно добиться повышения чувствительности при выбранном N .

Выражения для выходного сигнала (4) и (8) имеют одинаковую структуру, однако учет особенностей температурного поля мембраны в формуле (8) является более точным.

Для сравнения обеих моделей были рассчитаны тепловое сопротивление и чувствительность применительно к разработанному сенсору теплового потока [8], экспериментальная характеристика которого представлена на рис. 5 (измерения Сибирского института метрологии). Сенсор содержал 36 термопар "поликремний—алюминий", соединенных последовательно и имеющих коэффициент термоЭДС $\alpha = 0,12$ мВ/К. В интервале плотностей теплового потока 0...300 Вт/м² его чувствительность составляла $\beta = 5,68 \cdot 10^{-5}$ В·м²/Вт, а тепловое сопротивление $R_0 = 35,6$ К/Вт.

Наилучшее соответствие с экспериментальными данными упрощенная модель имеет, если принять, что горячие концы термопар находятся на границе теплопровода $r = r_1$, в месте контакта его с мембраной. Это приводит к чувствительности $\beta = 5,94 \cdot 10^{-5}$ В·м²/Вт и к преобразовательной характеристике, представленной на рис. 5 (зависимость 1). В действительности горячие концы термопар располагаются не строго при $r = r_1$, а в некоторой области вблизи этой границы. Расчеты по конечно-элементной модели дают значение чувствительности $\beta = 5,45 \cdot 10^{-5}$ В·м²/Вт (зависимость 3 на рис. 5) безо всякой подгонки, учи-

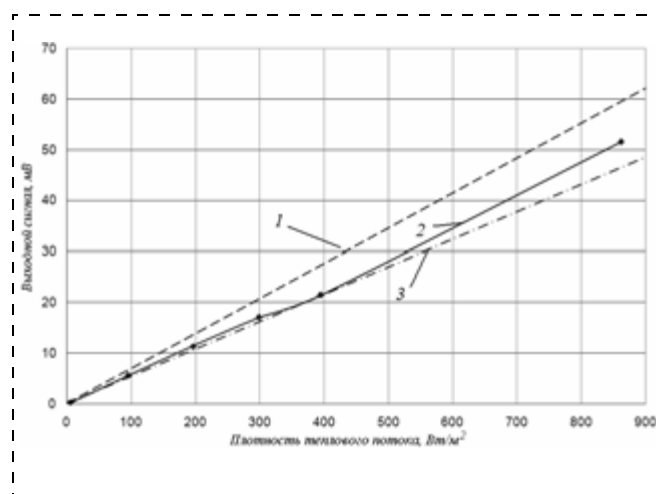


Рис. 5. Передаточная характеристика сенсора теплового потока: 1 — упрощенная модель; 2 — экспериментальные данные; 3 — численное моделирование

тывая лишь реальное расположение термопар на мембране.

Вместе с тем, для общего теплового сопротивления сенсора обе модели (при выбранном r_1) дают одинаковое значение теплового сопротивления $R_0 = 33,1$ К/Вт. Это указывает на возможность замены реальной квадратной мембраны на эквивалентную круглую при вычислении теплового сопротивления.

Выводы

Соответствие между модельными расчетами и экспериментом можно признать удовлетворительным, принимая во внимание возможное отличие реальных теплофизических характеристик материалов от принятых в расчетах. Таким образом, упрощенную модель с круглой мембраной можно использовать для расчетов теплового сопротивления сенсора теплового потока. Конечно-элементная модель является более точной и позволяет провести оптимизацию элементов конструкции.

Список литературы

1. **Hukseflux** Thermal Sensors, Application and Specification Heat Flux Sensors, [электронный документ]. URL: <http://www.hukseflux.com/downloads/thermalScience/applicAndSpec.pdf> (дата обращения 10.11.2009).
2. **HFM** heat flux microsensor [электронный документ]. URL: <http://www.vatell.com/hfm.htm> (дата обращения 10.11.2009).
3. **Mc Van Instruments**, Rimco CN3 Heat Flux Plate [электронный документ]. URL: <http://www.mcvan.com/images/stories/acrobat/cn3.pdf> (дата обращения 10.11.2009).
4. **Middelhoek S., Audet S. A.** Silicon sensors: сборник научных трудов. London: Acad. press, 1989. 376 p.
5. **Kovacs G. T.** Micromachined Transducers Sourcebook. — New York: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1998. 944 p.
6. **Stefanesoy S., de Anna R. J., Nehzegany M.** Experimental Performance of Micromachined Heat Flux Sensor // NASA Technical Memorandum 107517 [электронный документ]. URL: <http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/1998/TM-107517.pdf> (дата обращения 10.11.2009).
7. **Гридчин В. А., Лобач О. В.** Аналитическая модель сенсора теплового потока на основе профилированной мембраны // Материалы 8-й научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (АПЭП) / Под ред. Лисицыной Л. И. Новосибирск: Изд. НГТУ, 2006. С. 101—105.
8. **Гридчин В. А., Любимский В. М., Лобач О. В.** Micro-electronic Transducers for Heat-Power Engineering // Материалы 2-го Международного форума по стратегическим технологиям (IFOST), Улан-Батор (Монголия): Изд. МУНИ, 2007. С. 56—58.
9. **Гридчин В. А., Лобач О. В.** Тепловая модель сенсора плотности теплового потока // Материалы 1-й Международной школы-семинара по фундаментальным проблемам микро- и наносистемной техники (MNST) / Под ред. Гридчина А. В. — Новосибирск: Изд. НГТУ, 2008. С. 55—58.
10. **Meixner H., Jones R.** Sensors. A Comprehensive Survey. Vol. 8. Micro- and Nanosensor Technology. New York: VCH, 1995. 565 p.
11. **Meijer G. C. M., van Herwaarden A. W.** Thermal Sensors. — Bristol and Philadelphia: IOP Publishing Ltd., 1994. 300 p.
12. **Gerlach G., Doetzel W.** Einfuhrung in die Microsystemtechnik. — München: Fachbuchverl Leipzig im Carl Hanser Verl., 2006. 384 s.

С. Г. Новиков, канд. техн. наук, доц.,
e-mail: novikovsg@ulsu.ru,
Н. Т. Гурин, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф.,
e-mail: gurinnt@sv.ulsu.ru,
И. В. Корнеев, аспирант, мл. науч. сотр.,
e-mail: Korneev IV@gmail.com,
Ульяновский государственный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕГАТРОНА С ПЕРЕДАТОЧНОЙ N -ОБРАЗНОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Рассмотрен метод реализации встроенной защиты негатронов от токовых перегрузок в управляющей цепи на основе комбинации двух элементов с N -образной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Особенностями приборов, реализованных по данному методу, является наличие статических выходной и передаточной N -образной ВЛХ, а также одной или нескольких цепей положительной обратной связи, которые позволяют ограничивать диапазон рабочих входных токов и выходных напряжений в заданных пределах. Использование данного метода позволит создавать полупроводниковые структуры со встроенной защитой от токовых перегрузок и управляющей и нагрузочной цепях.

Ключевые слова: негатрон, отрицательное сопротивление, передаточная характеристика

Особенностью приборов с отрицательной дифференциальной проводимостью является наличие на выходной вольт-амперной характеристике (ВАХ) падающего участка тока при возрастающем напряжении питания. Это обстоятельство предполагает использование приборов с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) в качестве элементов защиты компонентов и узлов электронной техники от скачков тока и напряжения. При изменении выходного тока выше максимального прибор с ОДП переходит в выключенное состояние, в котором при малом токе на приборе падает практически все напряжение источника питания, тем самым отключая нагрузку.

Однако скачки напряжения и тока могут происходить и во входных цепях. В этом случае возникает задача защиты ключевых элементов от скачков токов и напряжений в управляющих ветвях. Более конкретно задача может быть сформулирована как поиск методов ограничения тока во входной и выходной цепях ключевых элементов.

В данной статье предложен метод решения поставленной задачи

за счет реализации встроенной защиты от скачков тока и напряжения на основе комбинации приборов с отрицательной проводимостью. Использование этого метода позволит реализовать как схемотехнические аналоги, так и твердотельные полупроводниковые приборы с защитой от скачков тока и напряжения на входе и выходе для использования в различных областях электроники.

Метод защиты заключается в комбинации двух приборов с ОДП, один из которых является неуправляемым двухэлектродным, а другой — управляемым трехэлектродным. Двухэлектродный N -прибор включается последовательно в цепь управления трехэлектродного N -прибора (рис. 1, а). При этом схема имеет передаточные и выходные N -образные ВАХ.

Рассмотрим данную схему и проведем анализ возможности ее применения для реализации негатрона с передаточной N -образной ВАХ.

Управление трехэлектродным N -прибором, например, аналогом биполярного негатрона, реализованного на базе схемы с шунтированием перехода база—эмиттер основного транзистора вторым биполярным транзистором того же типа, происходит посредством модуляции тока элементом с N -образной ВАХ, в качестве которого может выступать схемотехнический аналог λ -диода (рис. 1, б), состоящий из двух полевых транзисторов с управляющим p — n -переходом [1].

Цепь положительной обратной связи в основном N -приборе образована шунтирующим транзистором, коллектор—эмиттерная цепь которого управляет током база—эмиттер основного транзистора. При малых значениях коллекторного напряжения основного транзистора его эмиттерный переход закрыт и ток утечки базы минимален. При дальнейшем увеличении напряжения коллектор—эмиттер эмиттерный переход шунтирующего транзистора открывается, и прибор из режима отсечки переходит в активный режим работы, уменьшая таким образом ток базы основного транзистора и, следовательно, ток коллектора, что приводит к возникновению падающего участка тока при возрастающем напряжении на выходной характеристике.

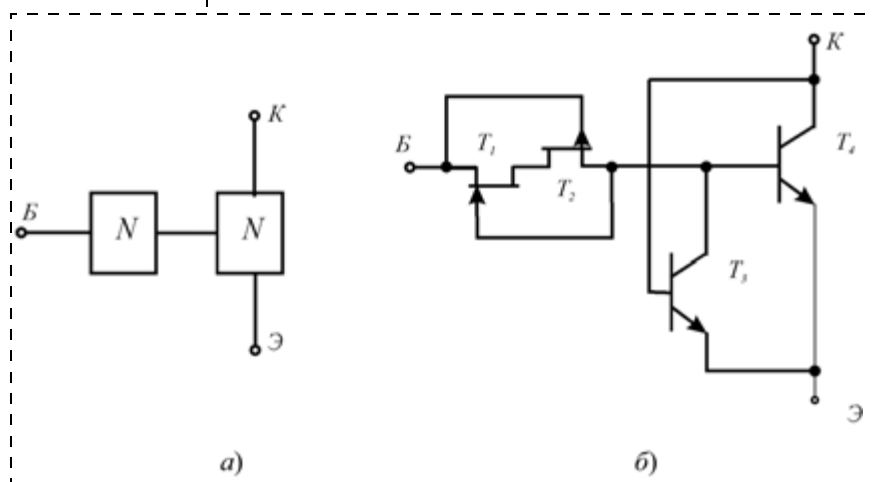


Рис. 1. Структурная схема метода защиты негатрона от перегрузок по току в цепи базы (а) и принципиальная схема на основе аналога λ -диода и биполярного негатрона (б)

При увеличении напряжения на входе такого комбинированного прибора его управляющий ток будет возрастать до момента, когда ток λ -диода достигнет максимального значения. Далее с ростом напряжения на λ -диоде происходит снижение тока, протекающего через него, а следовательно, и тока управления второго негatrona. Тем самым происходит ограничение тока управления и возникает участок отрицательной проводимости на передаточной ВАХ комбинированного прибора.

Для анализа и моделирования работы комбинированного прибора, схема которого приведена на рис. 1, б, рассмотрим выражение для ВАХ схемотехнического аналога λ -диода, а затем соединим полученную зависимость с выражениями для ВАХ негatrona.

Для получения выражения для ВАХ схемотехнического аналога λ -диода рассмотрим каждый элемент, состоящий из двух полевых транзисторов [1].

Для первого полевого транзистора

$$U_{c.и1} = U - U_{c.т};$$

$$U_{з.и1} = -U_{c.т};$$

где $U_{c.т}$ — напряжение средней точки λ -диода; U — напряжение на λ -диоде; $U_{c.и1}$, $U_{з.и1}$ — напряжение сток—исток и затвор—исток полевого транзистора. Тогда выражение для тока сток—исток $I_{c.и}$ можно записать в виде

$$I_{c.и1} = g_1[U_{c.т1} - K_1[(U_{c.и1} - U_{з.и1})^{3/2} - (U_{з.и1})^{3/2}]],$$

где g_1 , K_1 — константы, определяющие полупроводниковую структуру первого полевого транзистора.

Аналогично для второго транзистора

$$U_{c.и2} = U - U_{c.т};$$

$$U_{з.и2} = -U_{c.т};$$

$$I_{c.и2} = g_2[U_{c.и2} - K_2[(U_{c.и2} - U_{з.и2})^{3/2} - (U_{з.и2})^{3/2}]],$$

где g_2 , K_2 — константы, определяющие полупроводниковую структуру второго полевого транзистора.

При этом $I_{c.и1} = -I_{c.и2} = I$.

Выражения, описывающие теоретическую ВАХ λ -диода, получаем в виде

$$I = g_1[U - U_{c.т} - K_1[(U)^{3/2} - (U_{c.т})^{3/2}]]; \quad (1)$$

$$I = g_2[U_{c.т} - K_2[(U)^{3/2} - (U - U_{c.т})^{3/2}]].$$

Эти выражения справедливы при напряжениях, меньших напряжений отсечки полевых транзисторов.

Для моделирования ВАХ прибора с отрицательной проводимостью — негatrona [2] — можно воспользоваться моделями транзисторов Эберса—Молла [3].

Для построения математической модели введем некоторые ограничения:

- рассматриваемые составляющие структуру транзисторы являются бездрейфовыми;

- на характеристики не влияет различие между площадями эмиттера и коллектора. В активном режиме это допущение не приводит к существенным погрешностям;
- падения напряжения на омических сопротивлениях областей транзистора нет. Это допущение приемлемо при малых уровнях сигнала;
- рассматриваем только одномерную модель, т. е. считаем, что носители переносятся только в одном направлении и краевые эффекты отсутствуют.

Транзистор, соответствующий выходу прибора (рис. 1, б), назовем основным, а другой транзистор — шунтирующим. Будем обозначать эти транзисторы индексами "о" и "ш" соответственно.

Характеристические токи основного $I_{пэзо}$, $I_{пэко}$, $I_{пкко}$ и шунтирующего $I_{пэш}$, $I_{пкш}$, $I_{пккш}$ транзистора рассчитываются по известным формулам [3].

Напряжение на база—эмиттерном переходе основного транзистора без учета влияния шунтирующего транзистора определяется по формуле

$$U_{бзо} = -U_t \ln \left(\frac{I_{вх}}{I_{пэзо} + I_{пэко} - (I_{пэко} - I_{пкко}) e^{\frac{qU_{кзо}}{kT}}} + \frac{2I_{пэко} - I_{пэзо} - I_{пкко}}{I_{пэзо} - I_{пкзо} - (I_{пэко} - I_{пкко}) e^{\frac{qU_{кзо}}{kT}}} \right),$$

где q — элементарный заряд; k — постоянная Больцмана; T — температура.

Минимальное значение $U_{бзо} = U_{\min}$ основного транзистора будет достигнуто в момент, когда ток коллектора $I_{к.ш}$ шунтирующего транзистора сравняется с входным током $I_{вх}$. В этом случае шунтирующий транзистор максимально откроется и весь входной ток потечет через переход эмиттер—коллектор этого транзистора.

Ток коллектора шунтирующего транзистора без учета ограничения тока и с учетом того, что $U_{кэш} = U_{бзо}$ и $U_{кзо} = U_{бэш}$, определяется выражением

$$I_{к.ш} = I_{пкэш} \left(e^{\frac{qU_{кзо}}{kT}} - 1 \right) - I_{пккш} \left(e^{\frac{q(U_{бзо} - U_{кзо})}{kT}} - 1 \right).$$

При этом влияние шунтирующего транзистора на параметры основного транзистора проявляется как уменьшение тока базы основного транзистора практически до нуля за счет падения сопротивления коллектор—эмиттер шунтирующего транзистора до минимального значения. Поэтому ток базы основного

транзистора будет определяться системой уравнений на двух участках:

$$I_{\text{бo}} = \begin{cases} -I_{\text{пкэо}} \left(e^{\frac{-qU_{\text{кэо}}}{kT}} - 1 \right) + I_{\text{пкко}} \left(e^{\frac{qU_{\text{бэо}}}{kT}} - 1 \right) + I_{\text{вх}}, \\ U_{\text{кэо}} < U_{\text{min}}; \\ 0, U_{\text{кэо}} \geq U_{\text{min}}. \end{cases}$$

Для тока коллектора основного транзистора также можно выделить два участка:

- первый участок — до напряжения U_{min} — характеризуется выражением для коллекторного тока этого транзистора

$$I_{\text{ко}} = \frac{I_{\text{бo}} \left(I_{\text{пкэо}} - I_{\text{пкко}} e^{\frac{qU_{\text{кэо}}}{kT}} \right)}{I_{\text{пээо}} - I_{\text{пкэо}} - (I_{\text{пэко}} - I_{\text{пкко}}) e^{\frac{qU_{\text{кэо}}}{kT}}} + \frac{(I_{\text{пээо}} - 2I_{\text{пэко}} + I_{\text{пкко}})(I_{\text{пкэо}} - I_{\text{пкко}}) e^{\frac{qU_{\text{кэо}}}{kT}}}{I_{\text{пээо}} - I_{\text{пкэо}} - (I_{\text{пэко}} - I_{\text{пкко}}) e^{\frac{qU_{\text{кэо}}}{kT}} + I_{\text{пкко}} - I_{\text{пкэо}}};$$

- второй участок, на котором основное влияние вносит прямосмещенный база—эмиттерный переход шунтирующего транзистора, работающего в режиме насыщения, описывается зависимостью

$$I_{\text{бш}} = (I_{\text{пээо}} - 2I_{\text{пэко}} + 2I_{\text{пкко}}) \left(e^{\frac{q(-U_{\text{кэо}} + U_{\text{min}})}{kT}} - 1 \right).$$

Учитывая полученный ранее результат для тока λ -диода (1), получаем ток коллектора основного транзистора:

$$I_{\text{к}}(U_{\text{кэо}}, U_{\text{вх}}) = \frac{I_{\text{б}}(U_{\text{вх}}) + I_{\text{пээо}} + I_{\text{пкко}} - 2I_{\text{пкэо}} \left(I_{\text{пкэо}} - I_{\text{пкко}} e^{\frac{q(-U_{\text{кэо}})}{kT}} \right)}{I_{\text{пээо}} - I_{\text{пкэо}} - (I_{\text{пэко}} - I_{\text{пкко}}) e^{\frac{qU_{\text{кэо}}}{kT}} - I_{\text{пкэо}} + I_{\text{пкко}} + I_{\text{бш}}(U_{\text{вх}})}. \quad (2)$$

Графическая интерпретация выражения (2) представлена на рис. 2.

Сечение поверхности, приведенной на рис. 2, плоскостью $(I_{\text{к}}, U_{\text{кэ}})$ при фиксированном напряжении $U_{\text{бэ}}$ даст выходную характеристику, а сечение плоскостью $(I_{\text{к}}, U_{\text{бэ}})$ — передаточную.

Для проверки принципиальной работоспособности схемы замещения и подтверждения результатов математического моделирования рассмотренного прибора проведено схемотехническое моделирование с использованием программного модуля PSpice.

λ -диод реализован на основе двух полевых транзисторов из библиотеки пакета с заменой их модельных параметров на параметры, соответствующие экспериментальным образцам. Схемотехнический аналог биполярного негatrona реализован на базе транзисторов КТ3102.

В результате компьютерного моделирования получены семейство ВАХ, изображенное в виде поверхности на рис. 3.

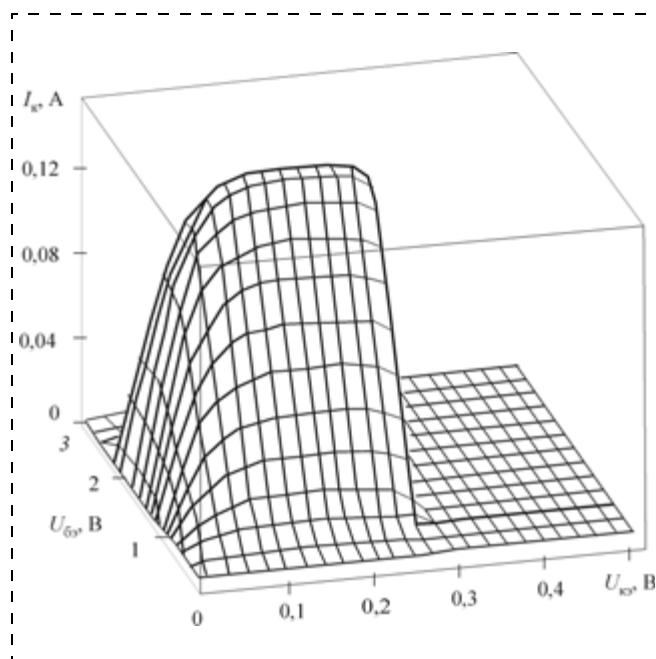


Рис. 2. Семейство выходных ВАХ негatrona с передаточной N -образной характеристикой, полученное в результате математического моделирования

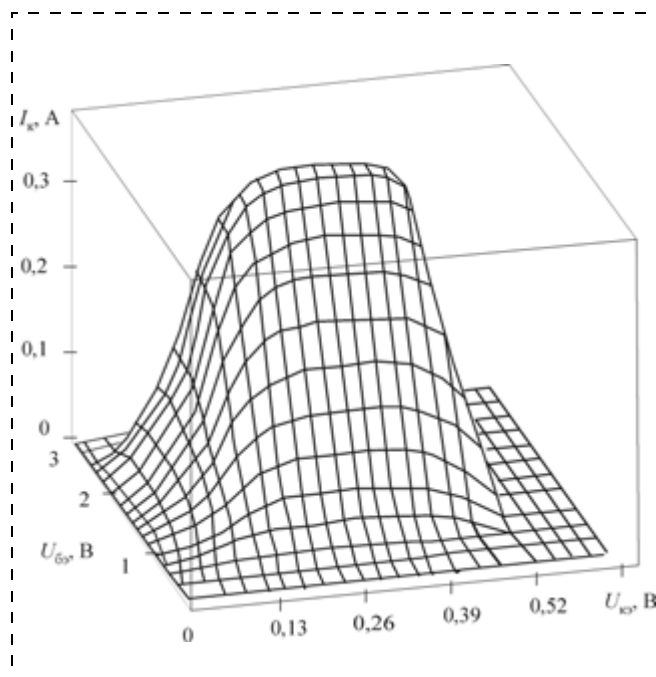


Рис. 3. Семейство выходных характеристик негatrona с передаточной N -образной ВАХ, полученное в результате схемотехнического моделирования

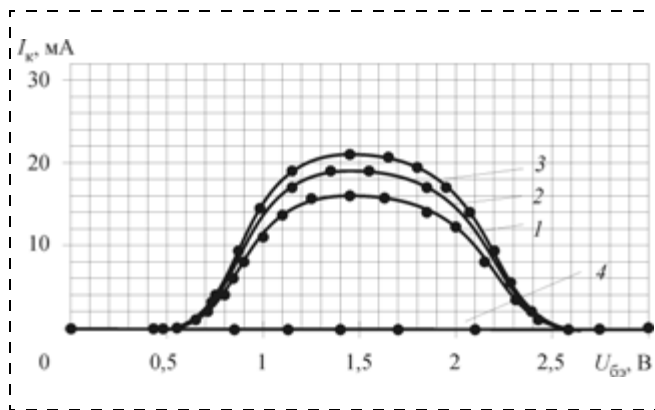


Рис. 4. Семейство передаточных характеристик экспериментального образца при различных значениях $U_{КЭ}$:

1 — 0,2 В; 2 — 0,3 В; 3 — 0,4 В; 4 — 0,6 В

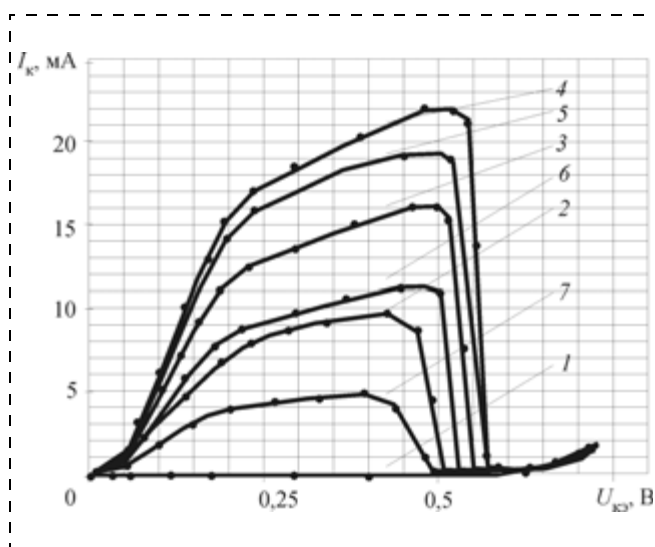


Рис. 5. Семейство выходных характеристик экспериментального образца при различных значениях $U_{БЭ}$:

1 — 0,5 В; 2 — 0,8 В; 3 — 1 В; 4 — 1,4 В; 5 — 1,7 В; 6 — 2,2 В; 7 — 2,4 В

Для подтверждения результатов математического и схемотехнического моделирования проведено экспериментальное исследование входных, выходных и передаточных характеристик экспериментальных образцов, реализованных на базе полевых транзисторов с управляющим p — n -переходом КП103 (канал p -типа) и КП303 (канал n -типа) и биполярных транзисторов КТ3102 с коэффициентами передачи $h_{21} = 120$.

Передаточная характеристика экспериментального макета негатрона (рис. 4) имеет N -образную форму с максимумом при напряжении 1,5 В. Как

следует из рисунка, увеличение выходного напряжения приводит к увеличению тока пика характеристики. При напряжении $U_{БЭ}$ свыше 1,5 В ток пика, т. е. нагрузочный ток, начинает уменьшаться, что обеспечивает защиту нагрузки от скачков тока и перенапряжения на входе.

Семейство выходных характеристик экспериментального образца приведено на рис. 5.

Как видно из рисунка, при увеличении входного напряжения первоначально происходит рост тока коллектора основного транзистора, а затем его уменьшение. Это и обеспечивает режим защиты по входу. Наличие вторичной положительной ветви на экспериментальных ВАХ обусловлено отсутствием в схеме корректирующих резистивных цепей.

При сравнении результатов математического (см. рис. 2), схемотехнического (см. рис. 3) моделирования и экспериментального исследования (см. рис. 4) можно отметить их хорошее качественное согласование. Количественное согласование в данном исследовании не достигнуто из-за упрощения математической модели и отличий параметров использованных моделей транзисторов от реальных параметров экспериментальных образцов.

Таким образом, предложенный метод реализации встроенной защиты негатрона от перегрузок в управляющей цепи на основе комбинации двух элементов с N -образной ВАХ является эффективным. Полученные аналитические соотношения для статических ВАХ рассмотренных структур могут быть использованы для расчета параметров приборов с защитой как по выходу, так и по входу, а разработанные схемотехнические модели приборов с N -образной выходной и переходной ВАХ могут быть использованы в качестве основы для проектирования твердотельных приборов такого типа. Элементы защиты, реализованные на базе приборов с ОДП, могут найти широкое применение в мехатронике, микросистемной технике, бортовой электронике, микропроцессорных системах, а также системах телекоммуникаций.

Работа поддержана грантом Министерства образования ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009" 2013 № П1158.

Список литературы

1. Sze S. M. Physics of Semiconductor devices. New York: Wiley, 2002, 347 p.
2. Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Корнеев И. В. Моделирование фотоприемника с отрицательной проводимостью на основе полупроводниковой структуры // Изв. вузов. ЭЛЕКТРОНИКА, 2006. № 4. С. 88–89.
3. Спиридонов Н. С. Основы теории транзисторов. Киев: Техника, 1975. 360 с.

УДК 532.64:62-408.8

Е. А. Гринькин*, аспирант,
П. Г. Бабаевский*, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
С. А. Жукова**, канд. техн. наук, нач. лаб.,
А. А. Жуков*, д-р техн. наук, проф.,
Д. Ю. Обижаев**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
* "МАТИ" — Российский государственный
технологический университет
им. К. Э. Циолковского,
** Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН
e-mail: evg_grinkin@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИИМИДА С РЕГУЛЯРНЫМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ НА АНИЗОМЕТРИЮ СИДЯЧЕЙ КАПЛИ ВОДЫ, АНИЗОТРОПИЮ И ГИСТЕРЕЗИС КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ

Проведены систематические исследования поведения капли воды, сидящей на поверхности полиимида с различной поверхностной энергией и двумя типами регулярного микрорельефа. Выявлены энергетические и геометрические факторы, определяющие форму капли и эффективный краевой угол смачивания в зависимости от наклона поверхности и направления относительно осей симметрии микрорельефа поверхности при его заданном характере.

Ключевые слова: смачивание, краевой угол, полиимид, микроструктурированные поверхности, удельная свободная поверхностная энергия, анизотропия смачивания, гистерезис смачивания, метастабильное состояние

Введение

Твердые поверхности различной природы и с различной структурной, энергетической и(или) химической микронеоднородностью (гетерогенностью), в частности, микрорельефные (микроструктурированные, микротекстурированные) с регулярно расположенными выступами или впадинами, получаемые методами поверхностной и объемной микрообработки, находят широкое применение в элементах микрожидкостных систем с управляемой траекторией движения капель жидкостей под действием элект-

рического поля, градиента поверхностной энергии или структурной асимметрии [1–6], в качестве самоочищающихся сверхгидрофобных структур с эффектом "лотоса" [7–8], "сухих" адгезивов [9–10], двумерных фотонных кристаллов [11], покрытий стенок микроканалов жидкостного охлаждения электронных приборов [12] и др.

Взаимодействие таких поверхностей с жидкостями, в первую очередь с водой, часто имеет решающее значение с точки зрения обеспечения как процессов производства, так и эффективности функционирования и надежности устройств на их основе. Такие поверхности являются также удобными и эффективными моделями при разработке и экспериментальной проверке теоретических подходов к описанию процессов, протекающих при контакте микрошероховатых и микропористых твердых поверхностей с жидкостью в резервуаре или в виде "сидячей" капли. Анализ поведения капли жидкости на таких поверхностях базируется на моделях (или режимах) Венцеля и Касси—Бакстера, являющихся развитием модели Юнга для шероховатых поверхностей. В модели Венцеля основание капли конформно топографии поверхности, и на границе раздела "жидкость — твердая поверхность" отсутствуют включения воздуха [13], а в модели Касси—Бакстера капля "сидит" на выступах, а на границе раздела "жидкость — твердая поверхность" присутствуют включения воздуха (композитный режим, или состояние "факира") [14].

Число исследований в этих направлениях в последние годы, особенно с начала этого десятилетия, нарастает экспоненциально, и основные дискуссии сводятся к выявлению роли глобальных и локальных процессов, протекающих при контакте капли жидкости с микрогетерогенной твердой поверхностью [15–17]. Наибольшее внимание при этом уделяется теоретическим и прикладным исследованиям режима Касси—Бакстера, при котором проявляется эффект сверхгидрофобности и самоочистки поверхностей (эффект "лотоса"): при заданном профиле микроструктурированной гидрофобной (неполярной) поверхности измеряемый (кажущийся, или эффективный) краевой угол смачивания водой может приближаться к 180° , тогда как равновесный угол на гладкой поверхности того же состава может незначительно превышать 90° [7–8, 18].

В последние несколько лет большое внимание стали уделять также исследованиям процессов взаимодействия жидкостей с микронеоднородными и микроструктурированными поверхностями с различной полярностью, равновесные углы смачи-

вания которых в случае гладкой поверхности меньше 90° [19–31]. При этом выявлены три резко выраженных эффекта:

- *анизометрия формы капли жидкости* на регулярной микрорельефной поверхности: превращение ее классической формы как части сферы в так называемую фасеточную форму, воспроизводящую геометрию решетки микрорельефа поверхности;
- *анизотропия смачивания*: различие измеряемого (эффективного) краевого угла капли в различных направлениях относительно осей симметрии микрорельефа поверхности;
- *гистерезис смачивания*: резкое увеличение разности углов смачивания при натекании и оттекании капли.

В этих исследованиях варьируют природу как поверхностей, так и жидкостей. Наиболее часто используют микроструктурированные поверхности кремния, обработанные кислородом и органохлорсиланами [6, 19–22, 28–29]. Исследованы также микроструктурированные поверхности золота [30] и ряда полимеров [23, 26, 27, 31]: полидиметилсилоксана, некоторых полимерных фоторезистов, жидкокристаллических полимеров и термопластов, в частности, полиметилметакрилата и полиметилэтилглицольметакрилата, в виде тонких слоев на твердых, обычно кремниевых подложках. На таких поверхностях формируют различные типы регулярного микрорельефа: заданным образом расположенные цилиндрические или призматические выступы (пики) или впадины (углубления), а также параллельные непрерывные "бороздки" с различным, в том числе синусоидальным, профилем сечения в перпендикулярном направлении, размеры, период или длина волны распределения которых значительно меньше размеров капли смачивающей жидкости (за исключением, естественно, длины "бороздок" в продольном направлении). В качестве жидкостей чаще всего используют воду, органические растворители или их смеси, равновесные краевые углы смачивания которыми гладких поверхностей составляют менее 90° .

Процессы смачивания водой микроструктурированных поверхностей полиимидов (ПИ), которые благодаря своим технологическим свойствам и наиболее высокой среди полимеров термостабильности находят широкое применение в технологиях поверхностной микрообработки, до настоящего времени не исследовались. Данная работа посвящена систематическим исследованиям поведения капли воды, сидящей на поверхности полиимида с различной поверхностной энергией и двумя типами регулярного микрорельефа, в целях выявления энергетических и геометрических (структурных или топографических) факторов, определяющих форму капли и измеряемый (эффективный) краевой угол капли в зависимости от наклона поверхности и направления относительно осей симметрии микрорельефа поверхности при его заданном характере.

Экспериментальная часть

Объектами исследований служили покрытия ПИ, полученные методом полива раствора полиамидокислоты (ПАК) на основе пиромеллитового диангидрида (ПМДА) и 4,4'-оксидианалина (ОДА) в диметилацетамиде (ДМАА) на кремниевые подложки и последующей сушки и термоимидизации. Концентрация раствора ПАК составляла 12 масс. % сухого остатка. Микрорельеф поверхности полученных ПИ-покрытий на основе ПМДА—ОДА толщиной, приблизительно равной 30 мкм, формировали методами фотолитографии с последующим анизотропным плазмохимическим травлением с применением СВЧ-плазменного стимулирования в условиях электронно-циклотронного резонанса. Маской при травлении ПИ служил слой нихрома, сформированный методом магнетронного распыления. Травление ПИ в кислородно-аргоновой плазме осуществляли в режиме, обеспечивающем вертикальный профиль травления [32]. После плазмохимического травления ПИ нихромовую маску удаляли жидкостным травлением и полученные ПИ-покрытия с заданным микрорельефом промывали деионизованной водой и отжигали при температуре 100°C в течение 1 ч. Отжиг обеспечивал восстановление значений углов смачивания водой и поверхностной энергии ПИ-поверхностей, подвергнутых различным обработкам (плазмохимическое травление, напыление и жидкостное травление нихрома) до значений, характерных для поверхности ПИ непосредственно после термоимидизации (равновесный угол смачивания $\theta_0 = 58^\circ$, удельная поверхностная энергия ПИ $\gamma_s = 55,9 \text{ мДж/м}^2$).

Микрорельеф поверхности полученных ПИ-покрытий представлял собой регулярно расположенные по принципу квадратной решетки микровыступы и микровпадины в форме прямоугольных параллелепипедов с квадратным сечением в плоскости покрытия (рис. 1).

Геометрические характеристики микрорельефа оценивали с помощью оптического микроскопа "Axioscop 2".

На рис. 2 приведены микрофотографии поверхности ПИ-покрытий с микровыступами (а) и микровпадинами (б), а в табл. 1 обобщены геометрические параметры микрорельефа исследованных поверхностей.

Поверхностную энергию ПИ-покрытий с гладкой и профилированной поверхностью после их формирования изменяли путем дополнительной об-

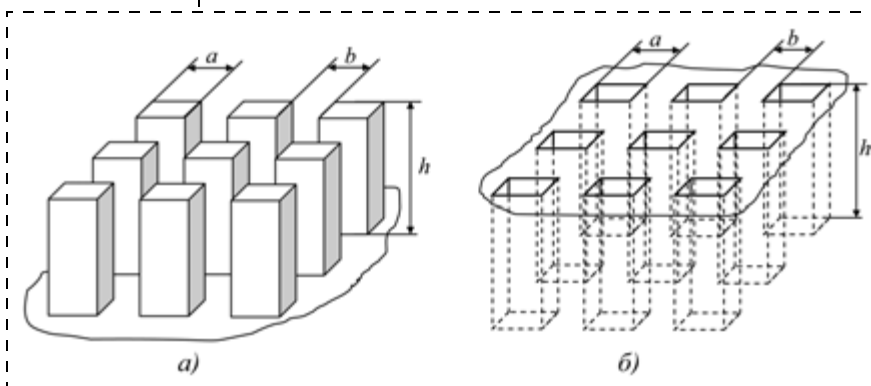


Рис. 1. Схематическое изображение микрорельефных поверхностей ПИ-покрытий с регулярно расположенными микровыступами (а) и микровпадинами (б)

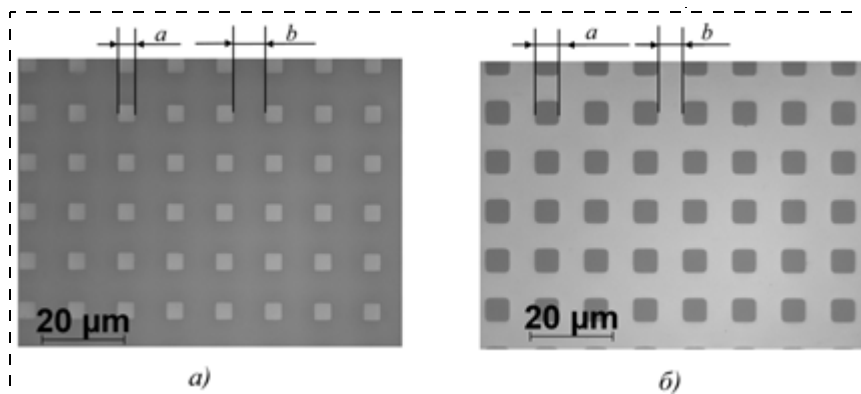


Рис. 2. Микрофотографии ПИ поверхностей с микровыступами (а) и микровпадинами (б)

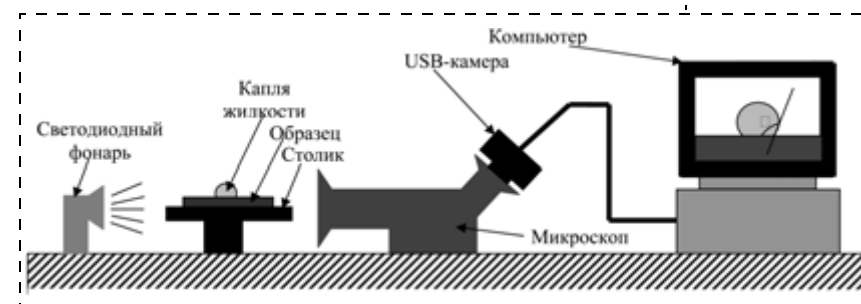


Рис. 3. Принципиальная схема стенда для измерения краевых углов смачивания жидкостями твердых поверхностей

работки в ВЧ плазме воздуха с последующим отжигом при температуре 100 °С в течение различного периода времени, а также обработкой в парах кипящего гексаметилдисилазана (ГМДС) [33, 34]. Удельную поверхностную энергию ПИ-покрытий с гладкой поверхностью до и после дополнительной обработки определяли по равновесным углам смачивания (θ_0)

Таблица 1
Геометрические параметры микрорельефа исследованных поверхностей ПИ-покрытий

Тип микрорельефа	Геометрические размеры, мкм		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>
Микровыступы	3,5÷12	4,3÷17,3	0,5÷15,3
Микровпадины	3,5÷15,5	1,0÷14,0	0,5÷16,8

исследуемой поверхности жидкостями различной полярности (деионизированной водой и α -бромнафталином) с известными значениями удельной поверхностной энергии (γ_L), ее дисперсионной (γ_L^D) и полярной (γ_L^P) составляющих при условии, что $\gamma_L^D + \gamma_L^P = \gamma_L$. Для расчетов использовали уравнение Вендта—Оуэнса [35]:

$$1 + \cos\theta_0 = \frac{2\sqrt{(\gamma_S^D\gamma_L^D)}}{\gamma_L} + \frac{2\sqrt{(\gamma_S^P\gamma_L^P)}}{\gamma_L},$$

где γ_S — удельная поверхностная энергия ПИ, γ_S^D , γ_S^P — ее дисперсионная и полярная составляющие соответственно, причем $\gamma_S = \gamma_S^D + \gamma_S^P$.

Полученные данные обобщены в табл. 2. Во всех случаях изменение поверхностной энергии ПИ обусловлено изменением ее полярной составляющей.

Равновесные углы смачивания деионизированной водой ПИ-поверхностей с гладким профилем, а также форму капель воды на микропрофилированных ПИ-поверхностях и эффективные краевые углы определяли методом сидячей капли с помощью разработанного стенда, принципиальная схема которого представлена на рис. 3. В состав стенда входят микроскоп, USB-камера, подключенная к компьютеру, столик для образца, светодиодный фонарь. Стенд функционирует следующим образом: на экране компьютера получают увеличенное изображение капли на поверхности образца и с помощью программы "Screen Protractor v. 4.0" определяют краевой угол смачивания. Объем капли жидкости варьируют с помощью микродозатора. Профиль капли наблюдали и фотографировали с помощью оптического микроскопа стенда, а вид сверху — с помощью микроскопа "Axioscop 2".

Таблица 2

Общая удельная поверхностная энергия ПИ (γ_S), ее дисперсионная (γ_S^D) и полярная (γ_S^P) составляющие и равновесный угол смачивания водой гладкой поверхности ПИ (θ_0) в зависимости от вида дополнительной обработки поверхности

Вид дополнительной обработки		Поверхностная энергия, мДж/м ²			Равновесный угол смачивания θ_0 , °
		γ_S	γ_S^D	γ_S^P	
Без дополнительной обработки		55,9	44,3	11,6	59
В ВЧ плазме воздуха с последующим отжигом в течение заданного периода времени, мин	10	72,8	44,5	28,3	25
	20	65,7	44,4	21,3	40
	30	61,9	44,4	17,5	47
В парах ГМДС		51,1	44,2	6,9	68

Результаты и их обсуждение

На рис. 4 приведены микрофотографии видов сверху (*a*) и сбоку по осям квадратной решетки (*б*) и по ее диагонали (*в*) (под углом 45° к осям решетки) капель воды объемом 2 мкл, сидящих на поверхности ПИ с различной удельной поверхностной энергией и, соответственно, различным равновесным уг-

лом смачивания водой θ_0 гладкой поверхности, с регулярно расположенными по принципу квадратной решетки микровыступами при одинаковых геометрических параметрах — размерах выступов, расстоянии между ними и их высоте: $a = 3,5$ мкм, $b = 7,5$ мкм, $h = 12$ мкм соответственно (см. рис. 1). Варьирование объема капель от 1 до 10 мкл практи-

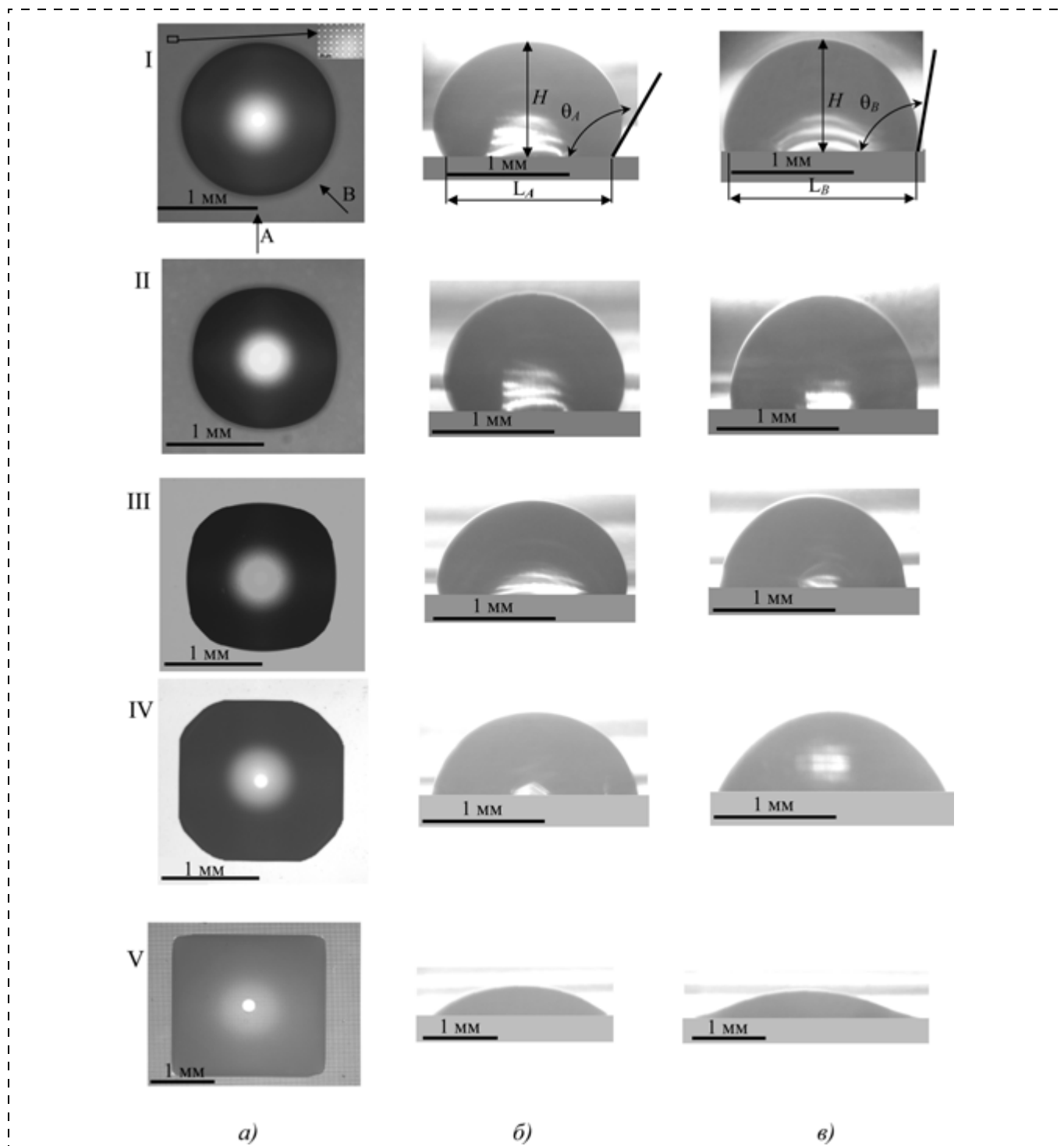


Рис. 4. Микрофотографии капель воды (*a* — вид сверху, *б*, *в* — виды сбоку):

по осям квадратной решетки (*б*) и по ее диагонали (*в*), сидящих на поверхности ПИ с различной удельной поверхностной энергией γ_S (мДж/м²) и равновесным углом смачивания гладкой поверхности водой θ_0 (в градусах) соответственно: 51,1 и 68° (I); 55,9 и 58° (II); 61,9 и 47° (III); 65,7 и 40° (IV); 72,8 и 25° (V) при регулярно расположенных на квадратной решетке микровыступах с одинаковыми размерами $a = 3,5$ мкм, $h = 12$ мкм и расстоянием между выступами $b = 7,5$ мкм

чески не сказывается на их форме. Изменение размеров микровыступов и расстояния между ними в достаточно широких пределах (см. табл. 1), при сохранении соотношения размера капли к периоду (шагу) решетки не менее 50, также мало сказывается на форме капель при одинаковой поверхностной энергии ПИ и одинаковом равновесном угле смачивания водой гладкой поверхности.

На микрофотографиях, приведенных на рис. 4, четко видна анизотропия формы капель воды, резко возрастающая с увеличением удельной поверхностной энергии ПИ и, соответственно, с уменьшением равновесного угла смачивания водой вплоть до образования фасеточной, близкой к квадратной, форме капли при $\gamma_S = 72,8$ мДж/м² и $\theta_0 = 25^\circ$. Наблюдается также заметное изменение эффективного краевого угла в различных направлениях относительно осей решетки: большие значения углов наблюдаются в направлении вдоль осей (θ_A), меньшие — по диагонали (θ_B).

Практически такой же вид, но с менее резко выраженной анизотрией, имеют капли воды на поверхности ПИ с распределенными по принципу квадратной решетки микровпадинами при одинаковой поверхностной энергии ПИ и эквивалентными по размерам (a , b и h) и характеру распределения элементами микрорельефа. Это может быть связано с большей площадью контакта сидящей капли с плоской поверхностью верхнего уровня в случае микровпадин по сравнению с микровыступами при одинаковых значениях a и b , так как в случае микровыступов a характеризует размеры верхнего уровня твердой поверхности, а с микровпадинами — нижнего, а b — наоборот (см. рис. 1). Так, расчеты доли площади верхнего плоского уровня поверхности по отношению к общей площади в плоскости поверх-

ности по уравнениям для микровыступов и микровпадин (углублений) соответственно

$$\phi_S^B = \frac{a^2}{(a+b)^2} \quad (1)$$

и

$$\phi_S^Y = \frac{(a+b)^2 - a^2}{(a+b)^2} \quad (2)$$

для указанных выше геометрических параметров дают значения $\phi_S^B = 0,10$ и $\phi_S^Y = 0,90$. С учетом размеров поверхности стенок элементов профиля в случае микровыступов и микровпадин, определяемых параметрами a и h , аналогичные расчеты доли площади верхнего уровня по отношению к общей площади поверхности соответствующего профиля по уравнениям для микровыступов и микровпадин соответственно

$$\phi_S^B = \frac{a^2}{(a+b)^2 + 4ah} \quad (3)$$

и

$$\phi_S^Y = \frac{(a+b)^2 - a^2}{(a+b)^2 + 4ah} \quad (4)$$

дают значения $\phi_S^B = 0,04$ и $\phi_S^Y = 0,38$.

На рис. 5 приведены микрофотографии вида сверху и линий контакта (по оси и по диагонали решетки) капли воды на поверхности обработанного

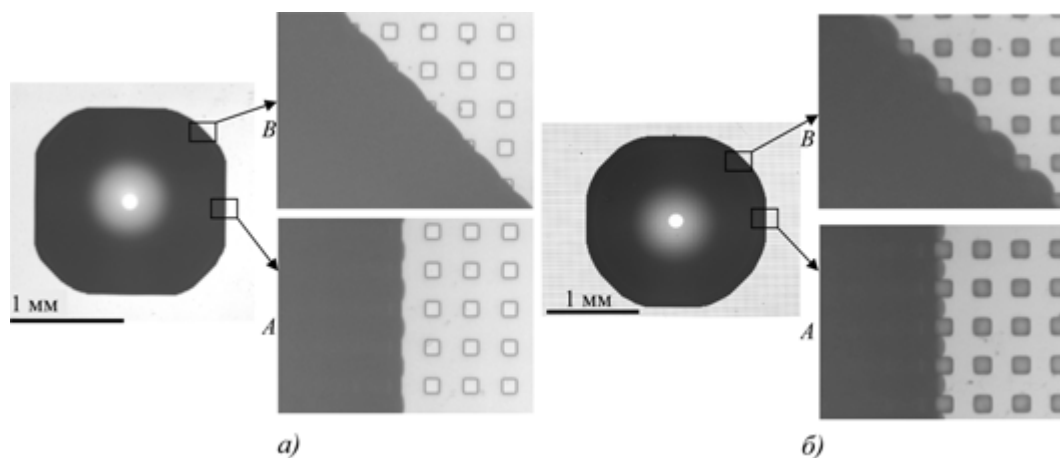


Рис. 5. Микрофотографии вида сверху (слева) и линий контакта (справа) капли воды на поверхности ПИ ($\gamma_S = 65,6$ мДж/м² и $\theta_0 = 40^\circ$) с регулярно расположенными микровыступами (а) и микровпадинами (б):

А — вид по оси квадратной решетки, В — вид по диагонали

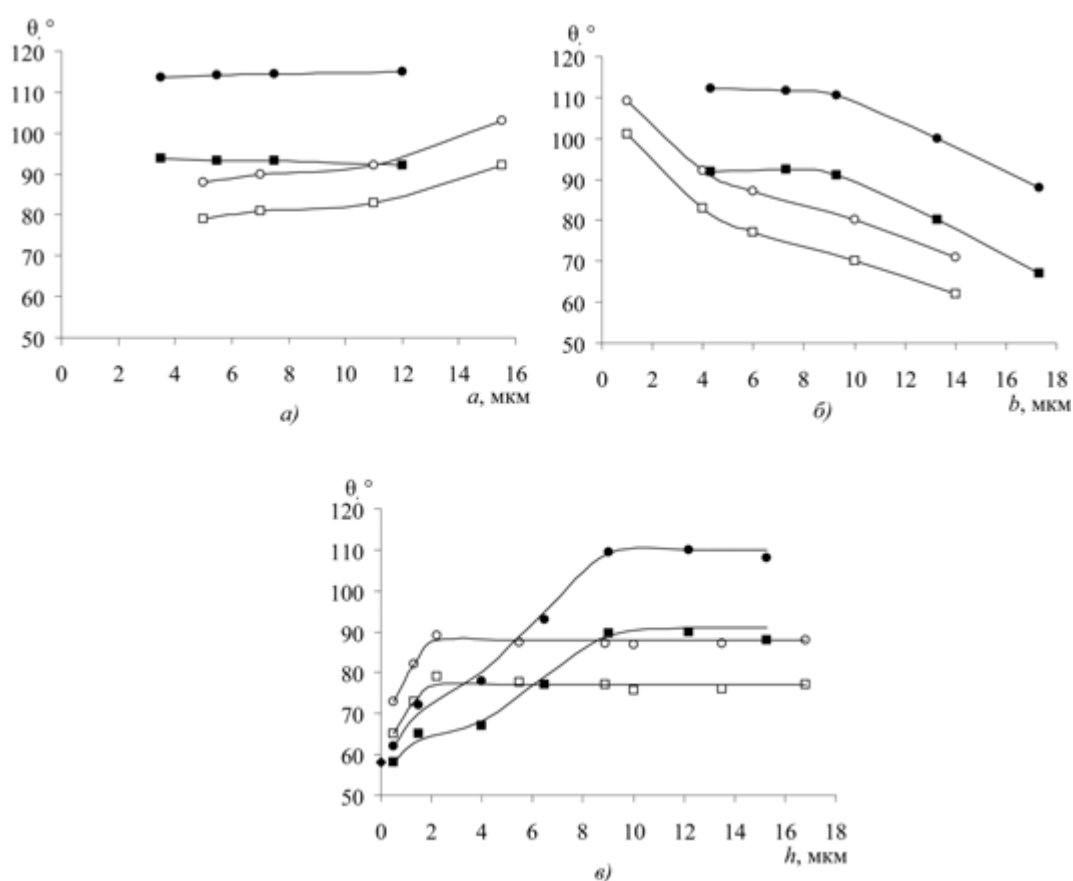


Рис. 6. Зависимости эффективных краевых углов смачивания капель воды поверхности ПИ, неподвергнутой дополнительным обработкам, с регулярно расположенными микровыступами (●, ■) и микровпадинами (○, □) вдоль осей решетки (●, ○) и по диагонали (■, □): а — от размеров верхней поверхности выступов и впадин a при постоянной высоте и глубине ($h = 12$ мкм) и расстоянии между выступами ($b = 8,5$ мкм) и впадинами ($b = 5$ мкм) соответственно; б — от расстояния между выступами и впадинами b при постоянных размерах верхней поверхности выступов ($a = 3,7$ мкм) и впадин ($a = 8,5$ мкм) и их высоте и глубине соответственно ($h = 12$ мкм); в — от высоты и глубины микровыступов и микровпадин h при постоянных размерах верхней поверхности выступов ($a = 4,5$ мкм) и впадин ($a = 6,0$ мкм) и расстоянии между выступами ($b = 7,5$ мкм) и впадинами ($b = 6,0$ мкм) соответственно

в ВЧ плазме воздуха ПИ ($\gamma_S = 65,6$ мДж/м² и $\theta_0 = 40^\circ$) с регулярно расположенными микровыступами (а) и микровпадинами (б) с эквивалентными геометрическими параметрами. При этом четко видно, что линия фронта капли задерживается на "микродфектах" (микровыступах и микровпадинах) текстурированных поверхностей ПИ.

На рис. 6 приведены типичные зависимости эффективных краевых углов смачивания капли воды на ПИ-поверхности, не подвергнутой дополнительным обработкам, с регулярно расположенными микровыступами и микровпадинами вдоль осей решетки (θ_A) и по диагонали (θ_B) от геометрических параметров текстуры поверхности. При этом θ_A всегда больше θ_B , и величина a практически не влияет на значения измеряемых углов, величина h влияет только при малых значениях (угол смачивания увеличивается с увеличением h до 2 мкм для впадин и до 8 мкм для выступов), а величина b влияет обратно пропорционально во всем исследованном диапазоне.

Полученные данные об анизотрии капель как отношении размеров основания капли L , проходящих через его центр и измеренных вдоль осей решетки и по диагонали (L_B/L_A), анизотропии смачивания как отношения эффективного краевого угла θ вдоль осей решетки и по ее диагонали (θ_A/θ_B) для исследованных поверхностей ПИ с регулярно расположенными микровыступами и микровпадинами с эквивалентными геометрическими параметрами обобщены в табл. 3.

Гистерезис краевых смачиваний водой микроструктурированных поверхностей ПИ определяли по их разности в нижней и верхней частях капли (углов натекания и оттеkania соответственно) вдоль осей решетки при соответствующем наклоне поверхности. При объеме капли до 5 мкл на поверхностях ПИ с микровыступами и микровпадинами капля не стекала с поверхности вплоть до угла наклона 90° . При этом эффективный краевой (контактный) угол при натекании увеличивается с ростом угла наклона поверхности ПИ сравнительно мало, а при от-

Таблица 3

Отношения размеров основания капли, проходящих через его центр и измеренных вдоль осей решетки и по диагонали (L_B/L_A) и отношения эффективных краевых углов вдоль осей решетки и по ее диагонали (θ_A/θ_B) при горизонтальной поверхности ПИ для поверхностей ПИ с различной поверхностной энергией и с регулярно расположенными микровыступами и микровпадинами с геометрическими параметрами $a = 3,5$ мкм, $b = 7,5$ мкм, $h = 12$ мкм

Тип микрорельефа	Поверхностная энергия ПИ, мДж/м	L_B/L_A	θ_A/θ_B , °
Микровыступы	51,1	1,11	1,20
	55,9	1,15	1,21
	61,9	1,20	1,25
	65,7	1,26	1,29
	72,8	1,41	1,78
Микровпадины	51,1	1,02	1,13
	55,9	1,03	1,14
	61,9	1,05	1,15
	65,7	1,08	1,17
	72,8	1,11	1,27

текании — значительно более резко. Типичный пример такой зависимости приведен на рис. 7.

Полученные нами результаты об анизотропии капель воды на микроструктурированных поверхностях ПИ с различной поверхностной энергией, анизотропии смачивания и гистерезисе краевых углов могут быть объяснены с позиций современных термодинамических и кинетических представлений, развитых в работах [19–21, 26–27], о глобальном и локальном взаимодействии жидкостей с микроструктурированными поверхностями, для которых при гладком профиле и химической и(или) энергетической однородности равновесные углы смачивания меньше 90° . С термодинамической точки зрения в таких системах минимизация изменений сво-

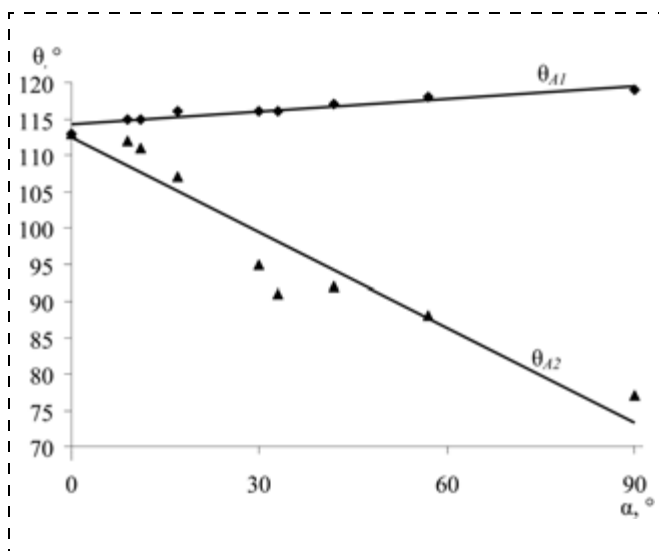


Рис. 7. Зависимости эффективного краевого угла при натекании (θ_{A1}) и оттекании (θ_{A2}) капли воды объемом 5 мкл на поверхности ПИ, неподвергнутой дополнительным обработкам, с микровыступами ($a = 3,5$ мкм, $b = 7,5$ мкм, $h = 12$ мкм от угла наклона поверхности α

бодной поверхностной энергии проявляется не только при глобальном (макроскопическом) контакте капли жидкости с твердой поверхностью, как в модели Юнга для гладких поверхностей и ее модификации, развитой Венцелем для шероховатых поверхностей, но и при возможном протекании локальных (микроскопических) процессов, в первую очередь — распространения пленки жидкости из капли в микропористое пространство профиля поверхности (ее впитывания микропрофилем поверхности) за счет капиллярных сил с проявлением так называемого "пленочного" режима. При распространении пленки (фронта впитывания) на величину dx локальная свободная энергия изменится на величину dE , приходящуюся на единицу длины фронта и равную [19]:

$$dE = (r - \phi_S)(\gamma_{SL} - \gamma_S)dx + (1 - \phi_S)\gamma_L dx, \quad (5)$$

где γ_S , γ_L , γ_{SL} — удельные свободные поверхностные энергии твердой поверхности и жидкости и их удельная межфазная энергия соответственно; r — шероховатость поверхности как отношение истинной площади поверхности к ее геометрической проекции, равное для исследуемых нами поверхностей (см. рис. 1–2)

$$r = \frac{(a+b)^2 + 4ah}{(a+b)^2}, \quad (6)$$

ϕ_S — доля площади поверхности, остающаяся сухой при продвижении пленки по микропрофильной структуре поверхности как капиллярной системе. Для исследуемых поверхностей ПИ с микровыступами вероятнее всего она должна быть равна доле площади верхней поверхности выступов по отношению к общей площади в плоскости поверхности ϕ_S^B , рассчитываемой по уравнению (1).

Первый член в правой части уравнения (5) соответствует изменению свободной энергии при замене сухой твердой поверхности на ее межфазную границу с жидкостью, а второй член — при формировании новой свободной поверхности жидкости (с паром) в результате продвижения пленки по капиллярному пространству поверхности. Так как пленка будет распространяться, если $dE < 0$, то с использованием уравнения Юнга

$$\gamma_L \cos \theta_0 = (\gamma_S - \gamma_{SL}) \quad (7)$$

определены следующие условия распространения пленки (впитывания жидкости микропрофилем поверхности):

$$\theta_0 \leq \theta_c; \quad \cos \theta_c = \frac{1 - \phi_S}{r - \phi_S}, \quad (8)$$

где θ_c — критический угол смачивания жидкостью микропрофильной поверхности; θ_0 — равновесный угол для идеально гладкой поверхности того же химического состава, меньший 90° . Так как $r > 1$, а $\phi_S < 1$, то значение θ_c для микропрофильной (микротекстурированной) поверхности должно всегда лежать между 0 и 90° .

Таким образом, в условиях термодинамического равновесия капля жидкости на микротекстурированной поверхности при $\theta_0 < 90^\circ$ может вести себя двояким образом, сохраняя в обоих случаях форму частей сферы:

- при $\theta_c \leq \theta_0 < 90^\circ$ жидкость из капли не должна впитываться микротекстурой поверхности, обеспечивая в равновесных условиях режим Венцеля и возможность применения для этих условий соответствующего уравнения для расчета эффективного угла смачивания:

$$\cos\theta_{эфф} = r\cos\theta_0; \quad (9)$$

- при $0 \leq \theta_0 < \theta_c$ жидкость из капли должна впитываться микротекстурой поверхности с формированием пленки, и капля будет сидеть на поверхности, состоящей из участков твердой (в нашем случае верхней) поверхности выступов и жидкой (между выступами) фаз. В этом случае, минимизируя изменение глобальной свободной энергии капли при малом макроскопическом изменении ее положения на такой поверхности

$$dE = \phi_S(\gamma_{SL} - \gamma_S)dx + (1 - \phi_S)\gamma_L dx \quad (10)$$

аналогично модели Юнга для идеально гладкой химически однородной поверхности, получено уравнение для эффективного краевого смачивания текстурированной поверхности при равновесных условиях:

$$\cos\theta_{эфф} = 1 - \phi_S(1 - \cos\theta_0). \quad (11)$$

При этом $\theta_{эфф} < \theta_0$.

При втором типе поведения впитывание жидкости микротекстурой поверхности может быть ограниченным или неограниченным, вплоть до полного исчерпания жидкости из капли (ее растекания). Для призматических микровыступов на поверхности (как в нашем случае) неограниченное продвижение пленки обуславливается наличием мениска жидкости вокруг каждого выступа и возможностью достижения каждым мениском соседнего выступа. Значение минимального равновесного угла смачивания, обеспечивающего возможность неограниченного распространения фронта жидкости в условиях тер-

модинамического равновесия, определяется соотношением [21]

$$\operatorname{tg}\theta_{0,\min} = h/b. \quad (12)$$

Для профилированной поверхности ПИ, образованной микровыступами с геометрическими параметрами $a = 3,5$ мкм, $b = 7,5$ мкм, $h = 12$ мкм, форма каплей воды на которой и эффективные краевые углы приведены на рис. 4—5 и в табл. 1, критический угол θ_c , рассчитанный по уравнению (8), равен 65° , а минимальный $\theta_{\min}$, рассчитанный по уравнению (12) — 58° . Следовательно, только для капель типа I и II на рис. 4 соблюдаются условия $\theta_0 > \theta_c$ и $\theta_c > \theta_0 > \theta_{\min}$, при которых "пленочный" режим не должен проявляться или должен проявляться, но с конечным распространением фронта впитываемой пленки, а эффективные краевые углы должны подчиняться уравнениям (9) и (11) соответственно. Для остальных типов капель (III—V, рис. 4) соблюдаются условия $\theta_c > \theta_0 < \theta_{\min}$, при которых должен проявляться "пленочный" режим с неограниченным распространением фронта впитываемой пленки, а эффективные краевые углы должны подчиняться уравнению (11). Однако для всех типов наблюдаемых капель эффективные краевые углы существенно больше рассчитанных по уравнениям (9) и (11), причем для капель типа I—III наблюдаемые углы больше 90° , а для капель типа IV—V — меньше 90° . При этом более высокие значения эффективного краевого угла наблюдаются на видах вдоль оси квадратной решетки и меньшие — по диагонали, а различия между этими значениями, как и между рассчитанными по уравнениям (9) и (11) и наблюдаемыми эффективными краевыми углами, уменьшаются с повышением удельной поверхностной энергии и, соответственно, с уменьшением равновесного угла смачивания гладкой поверхности. Для исследованных ПИ с самой высокой поверхностной энергией и, соответственно, с самым малым равновесным углом смачивания гладкой поверхности различие между эффективными краевыми углами, наблюдаемыми вдоль оси решетки и по диагонали, минимально, а эффективный краевой угол наиболее близок к рассчитанному по уравнению (11). Форма капель во всех случаях отклоняется от сферической, в пределе стремясь к квадратной форме решетки профиля поверхности (см. рис. 4—5).

Отклонения наблюдаемой формы капель воды на профилированных ПИ-поверхностях при различной удельной поверхностной энергии и заданной текстуре поверхности, особенно резко выраженные при равновесных углах смачивания гладких поверхностей, значительно меньших θ_c и $\theta_{\min}$, могут быть объяснены динамикой (механизмом и кинетикой) формирования и распространения линии контакта жидкости с поверхностью, определяемой соотношением дви-

жущей силы и сопротивления впитыванию. Для микротекстурированной поверхности с выступами капиллярная сила пропорциональна $\gamma_L \cos \theta_0 / d$, а сила вязкого сопротивления течению жидкости в порах — $\eta L V / d^2$, где d — характерный размер текстуры, определяемый высотой выступов и расстоянием между ними (в нашем случае h/b); L — расстояние фронта пленки от капли (резервуара); V — скорость движения фронта пленки [27].

На основе закона Дарси для течения жидкости в пористой системе показано [27], что

$$V_{\infty} (d\gamma_L / L\eta) \cos \theta_0. \quad (13)$$

Тогда с учетом классического уравнения Уэшборна для времени заполнения пор t жидкостью массой M

$$t = \left(\frac{\eta}{C\rho^2\gamma_L \cos \theta_0} \right) M^2, \quad (14)$$

где C — эмпирическая константа; η , ρ , γ_L — вязкость, плотность и удельная поверхностная энергия жидкости соответственно, скорость впитывания $V = \frac{dL}{dt} \propto t^{-1/2}$, а путь, пройденный пленкой, $L \propto t^{1/2}$, что соответствует скорости диффузионного процесса.

Очевидно, что медленное движение фронта пленки и четко выраженная задержка контактной линии капли на микроструктурных элементах за счет образующихся менисков (см. рис. 5) обуславливают метастабильное состояние капли на микротекстурированной поверхности. При этом анизотропия формы капель и возрастание ее степени с повышением поверхностной энергии ПИ наиболее вероятно связана с различной степенью задержки линии контакта капли на микровыступах вдоль оси решетки и по ее диагонали. Длина пути прохождения этой линии и размер выступов по диагонали в $\sqrt{2}$ раза больше, чем по осям решетки, что обуславливает более высокую скорость движения контактной линии капли вдоль осей и меньшую — по диагонали и, соответственно, вызывает ее асимметрию с более близкой к равновесной формой и меньшим по величине (более равновесным) значением эффективного краевого угла по диагонали. Вдоль осей капли проявляются противоположные эффекты. С увеличением поверхностной энергии ПИ и, соответственно, с увеличением капиллярных сил анизотропия формы капли возрастает, а различие в наблюдаемых эффективных краевых углах по осям решетки и по диагонали уменьшается. Аналогичные, но менее резко выраженные эффекты проявляются и в случае поверхностей ПИ с регулярно расположенными микровпадинами.

Выводы

Получены систематические экспериментальные данные об анизотропии формы капель воды и анизотропии краевых углов смачивания горизонтальных поверхностей ПИ в зависимости от их поверхностной энергии и микроструктуры, представляющей собой расположенные по принципу квадратной упаковки микровыступы и микровпадины в форме прямоугольных параллелепипедов с различными геометрическими параметрами (шириной, высотой или глубиной и расстоянием между ними), а также о гистерезисе краевых углов при натекании и оттекании капель при наклоне таких поверхностей на угол до 90° .

Показано, что решающую роль при этом играют механизм и кинетика локальных (микроскопических) процессов, протекающих в зоне контакта профиля капли с элементами микроструктуры, движущей силой которых является стремление к минимизации свободной поверхностной энергии.

Медленное, близкое к диффузионному, протекающие процессы распространения фронта капли и особенно пленки жидкости, впитываемой в поровое капиллярное пространство микроструктуры поверхности, а также стерические препятствия, определяющие задержку фронта на элементах микроструктуры, обуславливают формирование метастабильных капель, форма которых и углы смачивания как при горизонтальном, так и при наклонном расположении твердой поверхности зависят как от энергетических характеристик поверхности, так и от типа и геометрических параметров ее микроструктуры. Чем дальше метастабильное состояние капли находится от ее термодинамически равновесного состояния, тем больше анизотропия формы капель воды и ее соответствие параметрам решетки микроструктуры поверхности и тем больше анизотропия и гистерезис краевых углов смачивания поверхностей ПИ и, соответственно, их отличие от равновесных значений, рассчитываемых по уравнениям Венцеля и Бико. Очевидно, что определенную роль при этом могут играть воздушные включения, которые могут возникать при формировании капли на микротекстурированной поверхности, особенно при большом характеристическом отношении элементов ее микроструктуры, в нашем случае продольных и поперечных размеров выступов или впадин (h/a), частоты их расположения и вязкости жидкости.

Список литературы

1. Chaudhury M. K., Whitesides G. M. How to make water run uphill // Science. 1992. V. 256. N 5063. P. 1539—1541.
2. Stone H. A., Stroock A. D., Ajdari A. Engineering flows in small devices: microfluidics toward a lab-on-a-chip // Annual Review of Fluid Mechanics. 2004. V. 36. P. 381—411.

3. **Darhuber A. A., Valentino J. P., Davis J. M., Troian S. M., Wagner S.** Microfluidic actuation by modulation of surface stresses // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82. N 4. P. 657—659.
4. **Pollack M., Fair R., Shenderov A.** Electrowetting-based actuation of droplets for integrated microfluidics // *Lab on a Chip*. 2002. V. 2. P. 96—101.
5. **Daniel S., Sircar S., Gliem J., Chaudhury M. K.** Ratcheting motion of liquid drops on gradient surfaces // *Langmuir*. 2004. V. 20. N 10. P. 4085—4092.
6. **Shastri A., Case M. J., Bohringer K. F.** Engineering surface roughness to manipulate droplets in microfluidic systems // *Proceedings of the 18th IEEE International Conference on MEMS*, Miami Beach, Florida, USA. 2005. P. 694—697.
7. **Ma M., Hill R. M.** Superhydrophobic surfaces // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2006. V. 11. P. 193—202.
8. **Worgull M., Hecke M., Mappes T., Matthis B., Tosello G., Metz T., Gavillet J., Koltay P., Hansen H. N.** Sub- μ structured lotus surfaces manufacturing // *Symposium on design, test, integration and packaging of MEMS/MOEMS*, Nice, France. 2008. P. 330—334.
9. **Бабаевский П. Г., Жуков А. А., Шаповал С. Ю., Гринькин Е. А.** Адгезионное взаимодействие твердых поверхностей и создание полимерных "сухих" адгезивов. Теоретические аспекты // *Нано- и микросистемная техника*. 2006. № 2. С. 2—8.
10. **Гринькин Е. А., Жуков А. А., Шаповал С. Ю., Бабаевский П. Г.** Адгезионное взаимодействие твердых поверхностей и создание полимерных "сухих" адгезивов. Практические аспекты // *Нано- и микросистемная техника*. 2006. № 9. С. 13—20.
11. **Tinker M., Schonbrun E., Lee J.-B., Park W.** Process integration and development of inverted photonic crystal arrays // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. 2006. V. 24. N 2. P. 705—709.
12. **Enright R., Eason C., Dalton T., Hodes M., Salomon T., Kolodner P., Krupenkin T.** Friction factors and Nusselt numbers in microchannels with superhydrophobic walls // *4th International Conference on Nano, Micro and Mini Channels*, Limerick, Ireland. 2006. ICNMM2006-96134. P. 1—11.
13. **Wenzel R. N.** Resistance of solid surfaces to wetting by water // *Industrial and Engineering Chemistry*. 1936. V. 28. P. 988—994.
14. **Cassie A. B. D., Baxter S.** Wettability of porous surfaces // *Transactions of the Faraday Society*. 1944. V. 40. P. 546—551.
15. **Marmur A., Bittoun E.** When Wenzel and Cassie are right: reconciling local and global considerations // *Langmuir*. 2009. V. 25. P. 1277—1281.
16. **Gao L., McCarthy T. J.** How Wenzel and Cassie were wrong // *Langmuir*. 2007. V. 23. P. 3762—3765 and Comment by M. V. Panchagnula, S. Vedantam. P. 3766.
17. **de Gennes P. G., Brochard-Wyart F., Quéré D.** Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves. Springer. 2004. 291 p.
18. **Patankar N. A.** Transition between superhydrophobic states on rough surfaces // *Langmuir*. 2004. V. 20. P. 7097—7102.
19. **Bico J., Tordeux C., Quéré D.** Effects of some surface structures: stripes, cavities and spikes // *Europhysics Letters*. 1999. V. 47. N 2. P. 220—226.
20. **Bico J., Marsolin C., Quéré D.** Wetting of textured surfaces // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2002. V. 2006. P. 41—46.
21. **Bico J., Tordeux C., and Quéré D.** Rough Wetting // *Europhysics Letters*. 2001. V. 55. N 2. P. 214—220.
22. **Xia D., Brueck S. R. J.** Strongly anisotropic wetting on one-dimensional nanopatterned surfaces // *Nano Letters*. 2008. V. 8. N 9. P. 2819—2824.
23. **Zhao Y, Lu Q., Li M., Li X.** Anisotropic wetting characteristics on submicrometer-scale periodic grooved surface // *Langmuir*. 2007. V. 23. N 11. P. 6212—6217.
24. **Chung J. Y., Youngblood J. P., Stafford C. M.** Anisotropic wetting on tunable micro-wrinkled surfaces // *Soft Matter*. 2007. V. 3. P. 1163—1169.
25. **Gleiche M., Chi L. F., Fuchs H.** Nanoscopic channel lattices with controlled anisotropic wetting // *Nature*. 2000. V. 403. P. 173—175.
26. **Dorrer C, Ruhe J.** Drops on microstructured surfaces coated with hydrophilic polymers: Wenzel's model and beyond // *Langmuir*. 2008. V. 24. P. 1959—1964.
27. **Courbin L., Denieul E., Dressaire E., Roper M., Ajdary A., Stone H. A.** Imbibition by polygonal spreading on microdecorated surfaces // *Nature materials*. 2007. V. 6. P. 661—664.
28. **Cubaud T., Fermigier M., Jenffer P.** Spreading of large drops on patterned surfaces // *Oil & Gas Science and Technology*. 2001. V. 56. N 1. P. 23—31.
29. **Cubaud T., Fermigier M.** Faceted drops on heterogeneous surfaces // *Europhysics Letters*. 2001. V. 55. N 2. P. 239—245.
30. **Abdelsalem M., Bartlett P. N., Keif T., Baumberg J.** Wetting of regular structured gold surfaces // *Langmuir*. 2005. V. 21. N 5. P. 1753—1757.
31. **Hecke M., Worgull M., Mappes T., Tosello G., Metz T., Gavillet J., Koltay P., Hansen H. N.** Hot embossing of high aspect ratio sub- μ m structured surfaces for micro fluidic applications // *Proceedings of the 4th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, Cardiff, UK. 2008. P. 209—212.
32. **Бабаевский П. Г., Жуков А. А., Жукова С. А., Четверов Ю. С., Шаповал С. Ю.** Формирование рельефа в полиимидных покрытиях травлением в ЭЦР-плазме // *Прикладная физика*. 2004. № 1. С. 113—118.
33. **Жуков А. А., Жукова С. А., Драчев А. И.** Воздействие тлеющего ВЧ-разряда на полиимидные пленки различной структуры // *Матер. X Междунар. конференции "Физика диэлектриков" (Диэлектрики-2004)*. Санкт-Петербург. 2004. С. 337—339.
34. **Бабаевский П. Г., Жуков А. А., Коровина И. Ю., Си-ницына С. А., Четверов Ю. С.** Обработка тонких полиимидных покрытий кремнийорганическими соединениями и ВЧ-плазмой и ее влияние на характеристики поверхностей // *III Междунар. симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии*. Иваново: Ивановский госуниверситет. химико-техн. ун-т. 2002. Т. 2. С. 356—359.
35. **Кинлок Э.** Адгезия и адгезивы: наука и технология: Пер. с англ. М.: Мир. 1991. 484 с.

В. В. Слепцов, д-р техн. наук, проф.,
А. Ю. Тягинский, канд. техн. наук, доц.,
С. А. Артюхов, М. В. Церулев,
 ГОУ ВПО "МАТИ" — Российский
 государственный технологический университет
 им. К. Э. Циолковского
 e-mail: artukhov@mail.ru, 08fraktal@inbox.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАЛЛОВ В НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЖИДКИХ СРЕДАХ ЛАЗЕРНО- ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ. ЧАСТЬ 2. НЕЧЕТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассматривается решение задачи построения нечеткой системы вывода, моделирующей зависимость концентрации коллоидного раствора серебра от его светопропускания. Проводится анализ результатов моделирования в сравнении со значениями, полученными в ходе расчетов по эмпирической формуле, которая является лучшей в определенном классе формул в смысле минимизации суммы квадратов отклонений от экспериментальных данных.

Ключевые слова: нечеткая логика, нечеткие множества, эмпирические формулы, концентрация, коллоидные растворы

Введение

В предыдущей работе [1], посвященной определению концентрации нанодисперсных жидких сред лазерно-оптическим методом, рассматривалась методика построения эмпирической формулы, лучшей в некотором классе по критерию минимизации суммы квадратов отклонений модельных значений от экспериментальных данных. При решении задачи поиска формулы, описывающей зависимость концентрации водного раствора серебра от светопропускания, показано, что наилучшим выражением является

$$c(k) = \frac{491,84}{k} - 513,86. \quad (1)$$

Среднее значение погрешности на наборе экспериментальных данных составляет 4,65 %. В целях проведения более полного исследования ставится задача улучшения оценки показателей качества полученного решения путем применения аппарата нечетких множеств.

Нечеткая модель зависимости концентрации от светопропускания

При построении нечеткой модели возникает ряд вопросов оптимального в некотором смысле выбора ее параметров: типа функций принадлежности, формы композиции, импликации и дефазификации. Для корректного сравнения результатов моделирования на базе эмпирических формул и нечеткой логики необходимо выбрать наилучшие показатели нечеткой модели в смысле минимизации суммы квадратов отклонений результата от экспериментальных данных. С этой точки зрения наилучшим будет класс нечетких моделей с унимодальными функциями принадлежности (например, треугольными или гауссовыми), выводом по Мамдани и центроидным методом приведения к четкости; при таких условиях критерий оптимизации равен нулю. В случае симметричности функций принадлежности ограничения на применяемый метод дефазификации можно не накладывать [2]. Учитывая тот факт, что система логического вывода с симметричными треугольными функциями принадлежности, композицией с использованием нечеткой операции минимизации, импликацией по Мамдани и центроидным методом дефазификации является универсальным аппроксиматором [3], выберем для реализации модель именно такого вида, исключая условие симметричности функций принадлежности.

Исходные данные для построения такой модели приведены в табл. 1.

Инструментарием разработки выступила среда MATLAB версии 6.1.0.450 и пакет *Fuzzy Logic Toolbox*. Модель имеет одну входную (k) и одну выходную (c) переменную. Структурная схема показана на рис. 1.

По количеству экспериментальных данных проводится разбиение универсального множества значений входа и выхода на нечеткие подмножества. В данном случае имеется 5 нечетких подмножеств $k_1, \dots, k_5$ для входа и 5 подмножеств $c_1, \dots, c_5$ для выхода; функции принадлежности во всех случаях имеют треугольную форму. Указанные разбиения проиллюстрированы на рис. 2 и 3 для входа и выхода соответственно.

Правила вывода имеют следующий вид:

1. If (k is k_5) then (c is c_5).
2. If (k is k_4) then (c is c_4).
3. If (k is k_3) then (c is c_3).
4. If (k is k_2) then (c is c_2).
5. If (k is k_1) then (c is c_1).

Таблица 1

$k = U_n/U_0$, где $U_0 = 0,342$ мВ	c , мг/л
0,8363	74,4
0,8918	37,2
0,9240	18,6
0,9415	9,3
0,9474	4,65

Таблица 2

k	$c_{\text{эмп}}$	$c_{\text{нечет}}$	$ c_{\text{эмп}} - c_{\text{нечет}} $	Погрешность, %
0,850175	64,6519	54,7	9,956187844	18,20144
0,86405	55,36632	48,9	6,466317921	13,22355
0,877925	46,37009	45	1,370087992	3,04464
0,89985	32,71999	41,2	8,480014447	20,58256
0,9079	27,87367	38,6	10,72632889	27,78842
0,91595	23,11254	34,1	10,98745783	32,22128
0,928375	15,92592	20,6	4,674083748	22,68973
0,93275	13,44099	19,3	5,859008309	30,35756
0,937125	10,97927	17	6,020730959	35,41606
0,942975	7,723287	10,7	2,976713062	27,81975
0,94445	6,908701	10,4	3,491298639	33,57018
0,945925	6,096656	9,39	3,293343817	35,07288
		Σ		≈ 25

Таблица 3

$k = U_n/U_0$, где $U_0 = 0,342$ мВ	c , мг/л
0,8363	74,4
0,8634	55,8
0,8918	37,2
0,9079	27,9
0,9240	18,6
0,9319	13,95
0,9415	9,3
0,9443	6,965
0,9474	4,65

Сгенерированная поверхность отклика, интерпретируемая как график зависимости концентрации от светопропускания, представлена на рис. 4.

Задание входных значений и получение результата осуществляется в окне просмотра правил (рис. 5).

Модель демонстрирует нулевое расхождение с экспериментальными данными при совпадении входного значения со значением, обозначенным в правилах. Однако средняя погрешность вычислений составляет 20...25 %. Приняв эмпирическую зависимость $c(k) = \frac{491,84}{k} - 513,86$ как хорошо приближающую результаты эксперимента, сравним итоги вычислений концентрации по этой формуле с итогами использования построенной нечеткой системы (табл. 2).

На рис. 6 показан сравнительный график зависимостей концентрации от светопропускания, полученный с использованием эмпирической формулы (1) и нечеткой модели.

Получаем, что созданная на основе пяти экспериментальных пар вход—выход система нечеткого вывода демонстрирует высокую погрешность при аппроксимации зависимости концентрации от светопропускания.

В большом числе работ, посвященных использованию математического аппарата нечеткой логики при решении задач в различных областях, отмечается, что повысить точность аппроксимации возможно, увеличив количество экспериментальных данных. Построим нечеткую систему на основе данных, представленных в табл. 3. Здесь данные табл. 1 дополнены па-

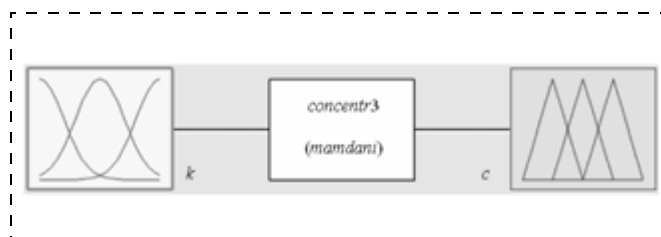


Рис. 1. Структура нечеткой модели для расчета концентрации

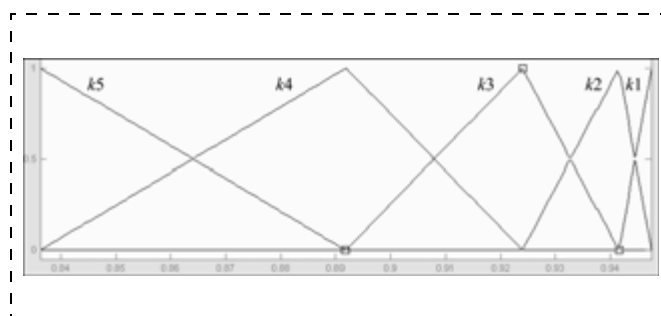


Рис. 2. Нечеткие подмножества и соответствующие треугольные функции принадлежности для входной переменной

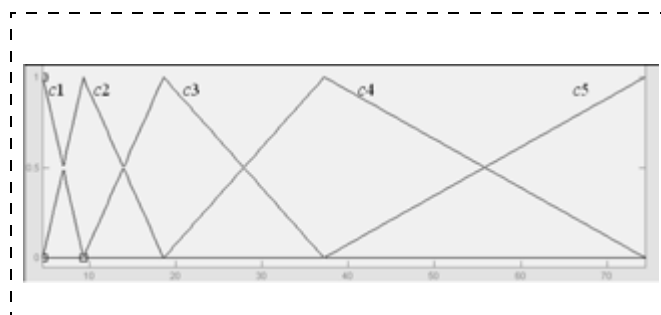


Рис. 3. Нечеткие подмножества и соответствующие треугольные функции принадлежности для выходной переменной

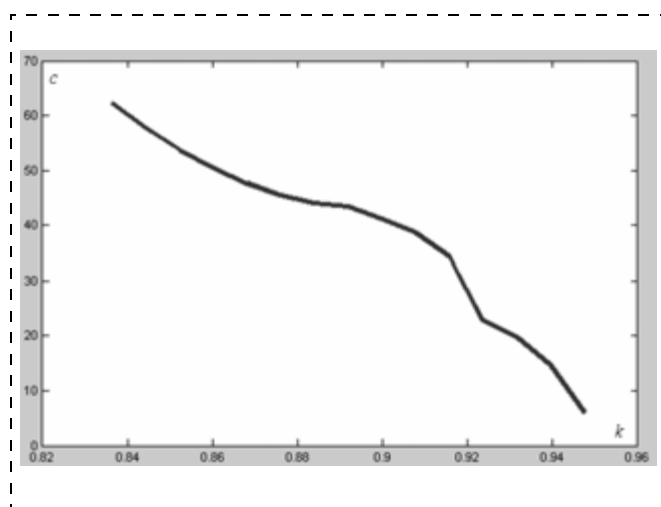


Рис. 4. Поверхность отклика нечеткой модели

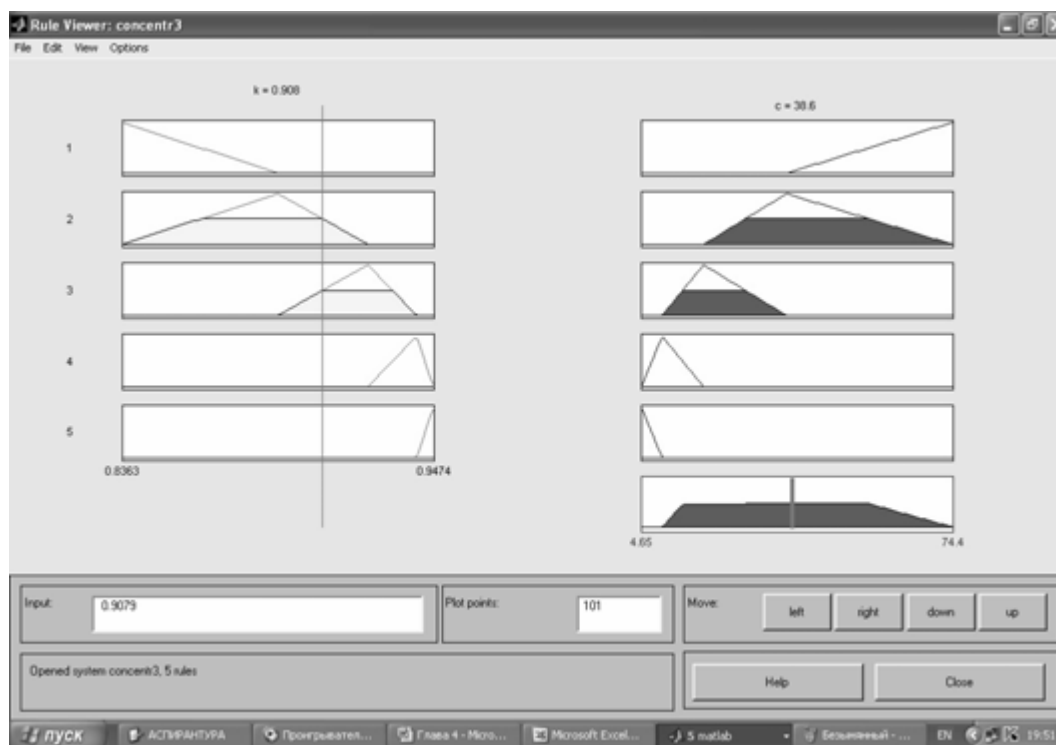


Рис. 5. Окно просмотра правил нечеткой системы вывода

рами, где добавленные значения концентрации c вычислены как среднее арифметическое двух соседних значений (середина отрезка), а соответствующие им значения k получены из формулы (1).

Поверхность отклика модифицированной нечеткой системы показана на рис. 7.

Сравнительная характеристика результатов моделирования эмпирической формулой и модифицированной нечеткой системой представлена в табл. 4 и на рис. 8.

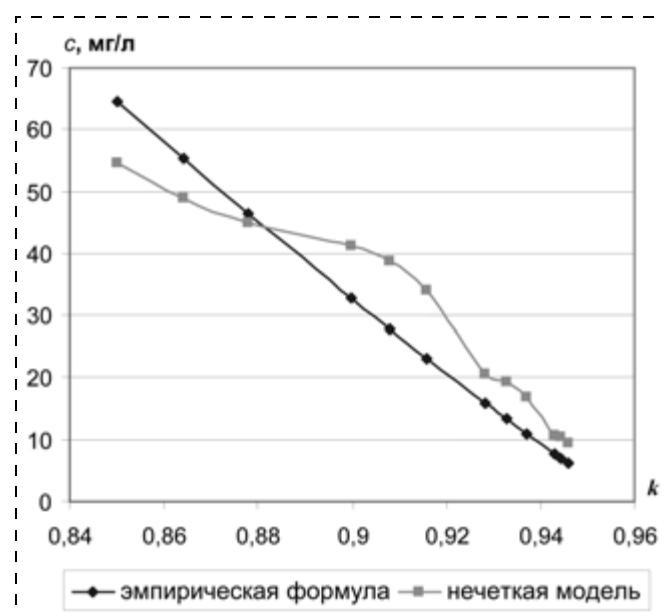


Рис. 6. Сравнение эмпирической и нечеткой моделей

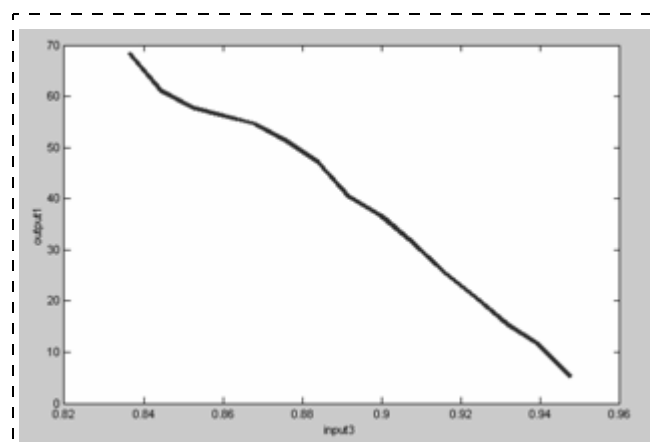


Рис. 7. Поверхность отклика системы нечеткого вывода, построенной на основе девяти пар данных

Таблица 4

k	$c_{\text{эмп}}$	$c_{\text{нечет}}$	$ c_{\text{эмп}} - c_{\text{нечет}} $	Погрешность, %
0,850175	64,6519	58,4	6,256187844	10,71265
0,86405	55,36632	55,8	0,433682079	0,777208
0,877925	46,37009	50,4	4,029912008	7,995857
0,89985	32,71999	36,6	3,880014447	10,60113
0,9079	27,87367	31,2	3,326328891	10,66131
0,91595	23,11254	25,5	2,387457831	9,36258
0,928375	15,92592	18	2,074083748	11,52269
0,93275	13,44099	13,8	0,359008309	2,601509
0,937125	10,97927	12,4	1,420730959	11,45751
0,942975	7,723287	8,31	0,586713062	7,060326
0,94445	6,908701	6,81	0,098701361	1,449359
0,945925	6,096656	6,31	0,213343817	3,381043
			Σ	$\approx 7,3$

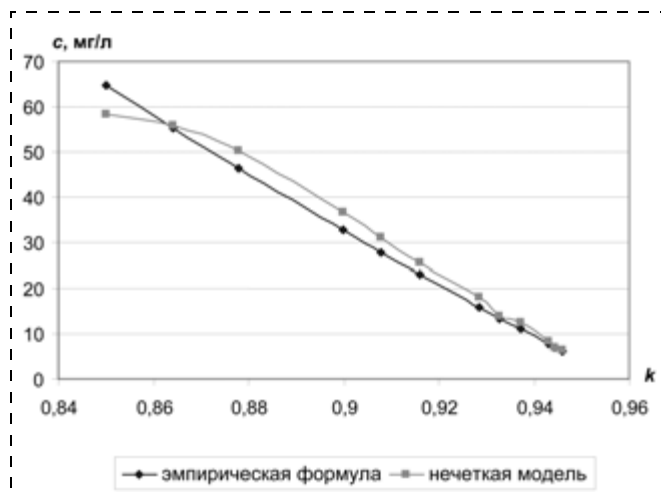


Рис. 8. Сравнение эмпирической и модифицированной нечеткой моделей

Выводы

Из графика следует, что в данном случае увеличение количества экспериментальных данных менее чем в 2 раза приводит к улучшению качества аппроксимации почти в 4 раза. Полагаем, что увеличение количества исходных данных является эффективным способом повышения качества синтезируемых нечетких моделей не только для рассматриваемой задачи, но и для более широкого класса задач.

Кроме того, отметим, что традиционные подходы приближенных вычислений применительно к изложенной выше задаче оказываются более приемлемыми, чем использование нечеткой логики. При ма-

лом количестве исходных данных преимущества в построении эмпирических формул перед синтезом нечеткой системы становятся более существенными, так как качество приближения эмпирических выражений в смысле минимизации среднего значения погрешности значительно выше, чем у нечетких моделей, при невысокой трудоемкости. Однако стоит отметить, что при "попадании" значения входной переменной в точечное значение, отраженное в системе правил вывода, невязка при использовании нечеткой системы, оптимальной по критерию минимизации суммы квадратов отклонений, равна нулю. В таких случаях проявляются преимущества аппарата на основе нечетких множеств.

Получаем, что уменьшение погрешности определения концентрации наноструктурированного водного раствора серебра, с использованием нечетких моделей, при сопоставимых трудозатратах не представляется возможным, и лучшее приближение дает

эмпирическая формула $c(k) = \frac{491,84}{k} - 513,86$.

Список литературы

1. Слепцов В. В., Тягинский А. Ю., Артюхов С. А., Церулев М. В. Определение концентрации металлов в наноструктурированных жидких средах лазерно-оптическим методом. Часть 1. Эмпирические формулы // Нано- и микро-системная техника. 2010. № 3. С. 24—29.
2. Блюмин С. Л., Шуйкова И. А., Сараев П. В. Нечеткая логика: алгебраические основы и приложения: Монография. Липецк: ЛЭГИ, 2002. 113 с.
3. Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети: учеб. пособие. М.: Физматлит, 2001. 224 с.

УДК 621.3.049.77.002

В. К. Смолин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
ФГУП "ФНПЦ НИИ измерительных систем
им. Ю. Е. Седакова", г. Нижний Новгород
e-mail: niiis@niiis.nnov.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖИДКОГО АЗОТА В ПРОЦЕССАХ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУР

Рассмотрены вопросы, связанные с применением низкотемпературной обработки в технологических процессах формирования элементов микроэлектронных структур. Показана эффективность обработки в жидком азоте при циклическом воздействии.

Ключевые слова: низкотемпературная обработка, модификация материалов, гетероструктура, перестройка дефектов

При рассмотрении проблем, связанных с действием пониженных температур на материалы и детали конструкций, выделяют два основных направления [1]:

- исследования, обусловленные необходимостью обеспечения работы техники в экстремальных условиях;
- исследования в области модификации материалов.

При снижении температуры термоактивируемые процессы в кристаллических телах уменьшаются. У металлов при значениях температуры ниже нормальной линейно уменьшаются электрическое сопротивление, коэффициент термического расширения, теплоемкость, которая в начале охлаждения уменьшается почти линейно, в криогенной области изменяется в третьей степени абсолютной температуры (закон Дебая) [2]. Изменение механических свойств металлов и сплавов при снижении температуры зависит от типа кристаллической решетки и несовершенства ее строения, размера зерен, вклю-

чения атомов легирующих элементов, фазового состава сплавов, а также состояния поверхности образцов. В области температур, близких к абсолютному нулю, при растяжении у ряда металлов и сплавов проявляется нестабильность пластического течения (скачкообразная деформация — эффект Портевена — Ле Шателье) [3]. Все схемы обработки металлов, включающие охлаждение до криогенных температур, как правило, предполагают термостабилизацию (отпуск или старение) после воздействия холода.

При рассмотрении приемов обработки изделий электронной техники, в большинстве своем представляющих собой гетероструктуры (например, пленочные композиции на изолирующих или полупроводниковых подложках), при пониженных температурах можно выделить следующие группы действий:

- однократное воздействие путем погружения образца в жидкий азот, выдержки в нем в течение некоторого промежутка времени и переход к нормальной температуре путем выдержки на воздухе;
- циклическая обработка;
- локальное энергетическое воздействие на элементы гетероструктур, находящихся в объеме сжиженного газа.

Выдержка гетероструктур в жидком азоте в течение 5...15 мин позволяет уменьшить механические напряжения в металлических покрытиях, повысить адгезионную устойчивость слоев и стабильность параметров пленочных элементов [4—7].

Переход к стационарному режиму сопровождается, во-первых, термоударом со скоростью изменения температуры в диапазоне 500... 600 К/мин, который активизирует процессы перехода субструктурных составляющих материалов в равновесное состояние, характеризующееся меньшим значением свободной энергии. Скорость нагрева или охлаждения образца ограничивается термостойкостью, т. е. перепадом температур ΔT между отдельными его частями, при котором механические напряжения, вызываемые тепловым расширением, становятся равными пределу прочности материала. Разность между нормальной температурой и температурой жидкого азота составляет 216 К, значение термостойкости многих подложечных материалов превышает это значение (например, для ситалла СТ 50-1 значение ΔT равно 240 К [8]). Во-вторых, газовые пузырьки при вскипании жидкого азота в приконтактной области оказывают кавитирующее действие на поверхность образцов. При критической температуре (125,9 К) давление газообразного азота в пузырьках достигает 3,39 МПа, что позволяет эффективно удалять механические частицы размером около 2 мкм, как это происходит при скруббировании поверхности [9]. Способ обработки сжиженными газами при давлении выше атмосферного предлагается использовать для очистки подложек радиоэлектронных изделий [10].

При циклической обработке многократное повторение нагрева и охлаждения приводит к генерации упругих волн, которые при каждом акте локальной перестройки дефектов инициируют и стимулируют струк-

турные изменения. Применительно к резистивным пленкам металлов и сплавов использование циклической обработки позволило достигнуть следующего:

- уменьшить по абсолютной величине значение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) пленочных элементов на основе тантала с $\rho_S = 10...12$ Ом/□ в 3 раза; уменьшить в 2—3 раза значение механических напряжений в пленках никеля [11];
- повысить стабильность и выход годных плат с резисторами из хромосилицидных сплавов [12, 13].

Общая продолжительность обработки обычно составляла 15...30 мин при продолжительности нахождения в жидком азоте или на воздухе 30...60 с.

Следует отметить, что эффективность применения обработки при пониженных температурах наблюдается только у свежесоздаваемых пленок. Старение пленочных резисторов на основе сплава РС-3710 (многокомпонентная система Cr—Ni—Si, часто рассматриваемая как дисилицид хрома, легированный никелем) характеризуется осциллирующим увеличением сопротивления, которое, согласно [14], является следствием релаксации упругих напряжений и определяется выражением

$$\partial R \approx \frac{1}{\tau} \left(\frac{\sigma_{\max}}{E} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]^{\frac{1}{2}},$$

где τ — время релаксации; $\sigma_{\max}$ — максимальное значение структурных напряжений; E — модуль упругости материала резистивной пленки.

Активированное состояние в рентгеноаморфных резистивных пленках может существовать длительное время при температурах ниже $0,3 T_{пл}$ [15] (для пленок сплава РС-3710 это примерно до температур 450 К). Воздействие обработки в жидком азоте повышает свободную энергию системы "пленка—подложка", и кинетика релаксации к равновесному состоянию будет определяться видом возмущающего действия и носителями активированного состояния.

Применительно к гетероструктурам, используемым в производстве полупроводниковых приборов, циклическая обработка в жидком азоте может выполняться с учетом особенностей композиции. В частности, после извлечения образцов из сосуда с жидким азотом возврат их температуры к нормальной осуществляется не на воздухе, а в жидкой среде. Так, при обработке структур "кремний—пленка диоксида кремния" образцы выдерживают при нормальной температуре в органическом растворителе (этанол), что препятствует замораживанию остаточной влаги в микропорах диэлектрика и предотвращает его разрушение [16]. В другом способе [17], при обработке структур "кремний на сапфире", в качестве жидкой среды используется водный раствор фтористоводородной кислоты, что обеспечивает удаление образующегося слоя диоксида кремния и подавление канала дополнительного образования новых дефектов и неконтролируемой перестройки исходных дефектов в пленке кремния.

Третья группа методов — локальное энергетическое воздействие на элементы гетероструктур, находящихся в объеме сжиженного газа, — может использоваться как для синтеза новых элементов структур (образование на поверхности кремниевой пластины соединений азота, например нитрида кремния, при ее облучении лазерным лучом [18]), так и для модификации существующих. Пропускание импульсов электрического тока плотностью $3 \cdot 10^6$ А/см², длительностью 1...2 с и периодом следования 10 с (определялось по окончании интенсивного кипения азота после прекращения подачи тока) позволило существенно изменить значения удельного сопротивления и ТКС никелевых пленок; при исходном удельном сопротивлении 2,5 Ом/□ изменение этих параметров достигает 30...50 % после воздействия 10 импульсов [19].

Объектами низкотемпературной обработки могут быть группы электрорадиоизделий различного функционального назначения, в том числе и изделия МСТ. Простота реализации и "стерильность" операций, допустимость различных совокупностей воздействий служат залогом успешного использования данного направления модификации материалов электронной техники.

Список литературы

1. Клименко А. П., Новиков Н. В., Смоленский Б. Л. и др. Холод в машиностроении. М.: Машиностроение, 1977. 192 с.
2. Справочник по физико-техническим основам криогеники // М. А. Малков, И. Б. Данилов, А. Г. Зельдович и др. Под ред. А. П. Малкова, 3-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1985. 437 с.
3. Физические эффекты в машиностроении. Справочник // В. А. Лукьянец, З. И. Алмазова, Н. П. Бурмистрова и др. Под общ. ред. В. А. Лукьянца. — М.: Машиностроение, 1992. 224 с.

4. Жмудь Е. С., Пепшина Л. К. Снятие растяжений в медной пленке на подложке в результате криогенного охлаждения // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1990. № 7 (431). С. 59.
5. Ларин В. С., Постников С. Н., Россинский В. А. и др. Способ изготовления пленочных резисторов: а. с. СССР № 950076, БИ № 29, 1982.
6. Сеницкий Р. В., Кошечев В. Д., Руднева Ф. Н. Способ получения топологического рисунка методом фотолитографии: а. с. СССР № 1245165, БИ № 26, 1986.
7. Латышева Н. Д., Скупов В. Д., Смолин В. К. Способ формирования фоторезистивной маски: пат. РФ № 2195047, опубл. 20.12.2002.
8. Мачулка Г. А. Лазерная обработка стекла. М.: Сов. радио, 1979. 136 с.
9. Полтавцев Ю. Г., Князев А. С. Технология обработки поверхностей в микроэлектронике. — Киев: Техника, 1990. 206 с.
10. Алаев Б. С., Алаев С. Б., Касьянов Г. И. и др. Способ очистки поверхности подложек радиоэлектронных изделий: пат. РФ № 2041576, опубл. 09.08.1995 г.
11. Скупов В. Д., Смолин В. К. Способ изготовления пленочных резисторов: пат. РФ № 2046419, опубл. 20.10.1995.
12. Смолин В. К., Уткин В. П. Способ изготовления многослойных тонкопленочных резисторов: пат. РФ № 2145744, опубл. 20.02.2000.
13. Скупов В. Д., Смолин В. К. Способ изготовления пленочных резисторов: пат. РФ № 2109360, опубл. 20.04.1998.
14. Щуплинская П. Е. Стабилизация электросопротивления тонкопленочного резистора // Известия ЛЭТИ. Вып. 165, 1975. С. 31—34.
15. Палатник Л. С., Сорокин В. К. Материаловедение в микроэлектронике. М.: Энергия, 1977. 280 с.
16. Скупов В. Д., Смолин В. К. Способ изготовления структур кремний — пленка диоксида кремния: пат. РФ № 2128382, опубл. 27.03.1999.
17. Скупов В. Д., Смолин В. К. Способ обработки структур "кремний на сапфире": пат. РФ № 2185685, опубл. 20.07.2002.
18. Способ изготовления полупроводникового прибора: пат. Японии № 56-130930 // Изобретения стран мира. 1991. Вып. 10, № 16.
19. Смолин В. К., Кондрашевский В. П. Способ изготовления тонкопленочных резисторов: пат. РФ № 2183876, опубл. 20.06.2002.

УДК 548.74.537.226.4

А. А. Агасиев, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Ч. Г. Ахундов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
М. З. Мамедов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
С. Н. Сармасов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
Г. М. Мамедов, канд. физ.-мат. наук, доц.,
Бакинский государственный университет

НАНОСТРУКТУРНЫЕ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК SrTiO_3

Магнетронным распылением получены пленки титаната стронция. Рассмотрена морфология и структура пленок. Определены средние размеры (~1...2 нм) псевдозерен, которые хорошо согласуются с размерами областей когерентного рассеяния. Оценены межатомные расстояния $\text{Ti}-\text{O}$, $\text{Sr}-\text{O}$, $\text{O}-\text{O}$ в неупорядоченных и поликристаллических слоях. С помощью атомно-силового и сканирующего туннельного микроскопов исследована поверхность пленки.

Ключевые слова: тонкие пленки, магнетронное распыление, SrTiO_3 , морфология поверхности

Введение

Тонкие пленки сложных металлооксидов на поверхности твердого тела находят применение в микроэлектронике, оптическом приборостроении и других областях техники в качестве диэлектрических и защитных покрытий [1—3]. Отметим, что технология получения таких покрытий достаточно хорошо совмещается с технологическими процессами создания приборов микроэлектроники и микросистемной электроники. Сегнетоэлектрические пленки титаната стронция (SrTiO_3) активно исследуют в целях интеграции в технологии создания конденсаторных элементов нового поколения, запоминающих устройств [4—6]. К преимуществам этих структур отно-

сятся их повышенная радиационная стойкость, термостойкость и низкое энергопотребление.

В настоящей работе рассмотрены строение молекулярной структуры и адсорбционные свойства наноразмерных пленок SrTiO_3 , полученных магнетронным распылением.

Результаты и обсуждения

Тонкие пленки SrTiO_3 получали магнетронным распылением в среде аргона с небольшим содержанием кислорода [7, 8]. Слои наносили на пластинки NaCl , стекло и ситалл. Микрофотография и электронограмма пленки SrTiO_3 на NaCl представлена на рис. 1. Пленки, полученные на подложке из каменной соли при комнатной температуре, рассматривали в электронном микроскопе. С помощью микродифракции от пленок получали снятые с кратными экспозициями электронограммы, которые фотометрировали с применением логарифматора в пропорциональной области кривой почернения и эталонных электронограмм NaCl .

Микроструктура слоя на холодной подложке представляет собой распределение темных участков размерами порядка нескольких десятков ангстрем в более светлом межзеренном пространстве. Средние размеры псевдозерен (~1...2 нм) были оценены из полуширины дифракционных линий при предположении, что уширение вызвано дисперсностью структуры. Эти размеры хорошо согласовались с размерами областей когерентного рассеяния (ОКР). Величина ОКР определяется выражением $L = \lambda / (B - B_0)$, где λ — длина волны; B и B_0 — соответственно полуширина рабочего и эталонного рефлекса. При $\lambda \approx 0,04...0,05 \text{ \AA}$ разность $B - B_0 \approx (2,5...3,5)10^{-3}$ рад. На рис. 2 представлена кривая радиального распределения $D(r)$ неупорядоченных пленок, а также построенная для сравнения кривая $D(r)$ поликристаллического конденсата SrTiO_3 [9]. На кривой радиального распределения поликристаллической пленки первые два максимума отвечают расстояниям Ti—O , Sr—O , O—O соответственно, остальные вследствие перекрытия носят сложный характер и могут быть интерпретированы в предполо-

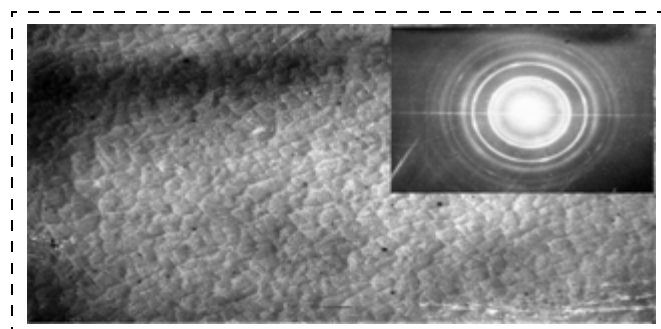


Рис. 1. Микрофотография и электронограмма пленки SrTiO_3

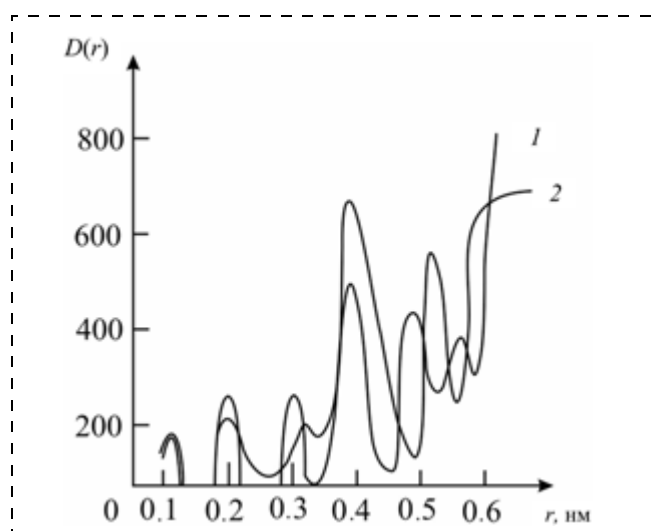


Рис. 2. Функция $D(r)$ для поликристаллического (1) и неупорядоченного (2) пленок SrTiO_3

ложении средних межатомных расстояний в кристалле титаната стронция. Функция $D(r)$ конденсатов на холодной подложке состоит из того же числа максимумов, которые несколько смещены относительно пиков кривой для поликристаллической пленки. Для неупорядоченной пленки структура каждого "псевдозерна", несмотря на перовскитоподобный характер, несколько отличается от структуры кристаллического конденсата по межатомным расстояниям. Эти расстояния в кристаллической и неупорядоченной пленке близки только для первых координационных сфер, с увеличением радиуса сферы корреляции уменьшаются. Функция $D(r)$ для неупорядоченных слоев по длинным, полученным в электронографе с высоким ускоряющим напряжением (~400 кВ) расстоянием Ti—O , Sr—O , O—O , остальные являются суперпозицией радиусов следующих координационных сфер. Различие радиусов для поликристаллической и неупорядоченной пленок составляет 4,9 %, что указывает на смещения атомов в неупорядоченном тонком слое из нормальных положений, занимаемых ими в кристаллической структуре, с сохранением координации в соответствии с перовскитовым типом. Хотя диффузный характер рассеяния определяется в основном малостью ОКР, микродеформация решетки, связанная с атомными сдвигами, вносит вклад в уширение дифракционных отношений. Теоретические интенсивности дифракции, рассчитанные по модели ближнего порядка, хорошо согласуются с экспериментальными при размерах упорядоченных областей от 0,8 до 1,2 нм, что также близко к значениям, полученным из расчета полуширины линии, а также к размеру "псевдозерен". Ближний порядок структуры на холодной подложке обусловлен как малостью произвольно ориентированных псевдозерен, так и смещениями атомов с позиций, занимаемых ими в кристаллической структуре (решеточными дефектами).

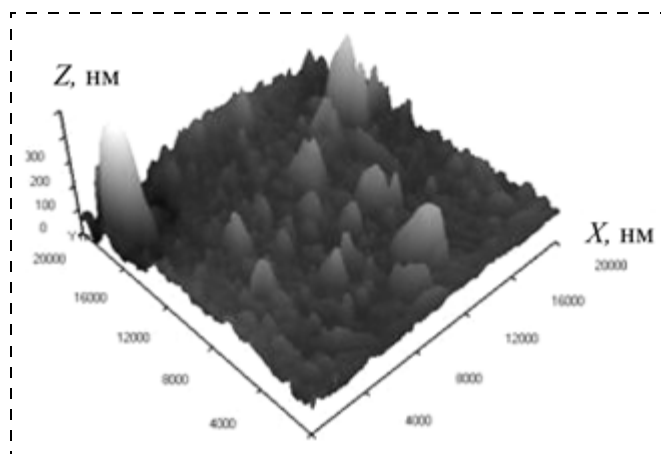


Рис. 3. АСМ-изображение для пленки SrTiO_3 с эффективной толщиной $\sim 4,5$ нм

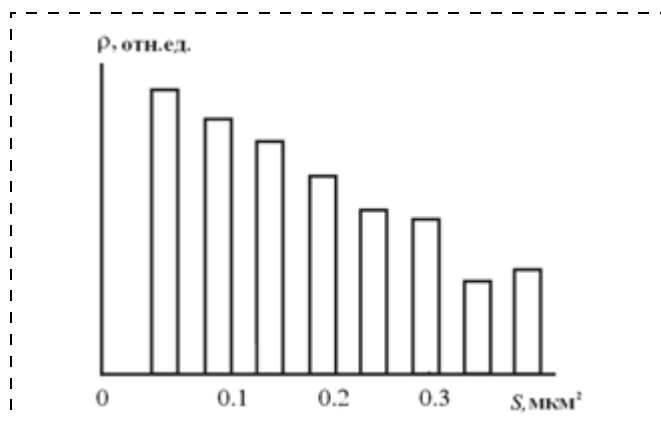


Рис. 4. Распределение микрочастиц ρ по доле занимаемой площади S

Размерные параметры пленок исследовались методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), сканирующим туннельным (СТМ) и просвечивающим электронным микроскопами ЭМ-14.

На рис. 3 приведено характерное АСМ-изображение поверхностного рельефа пленки SrTiO_3 . Для эффективной толщины d пленки и соответствующему распределению микрочастиц ρ по доле занимаемой площади S определяли средневзвешенную площадь основания частиц, плотность частиц и степени заполнения поверхности по площади их основания. Строилась гистограмма (рис. 4) плотности распределения кластеров ρ и степень заполнения поверхности S размером 20 нм [10]. На начальных стадиях при толщине ~ 12 нм наблюдается процесс образования больших по размеру кластеров. Однако при толщине слоя ~ 6 нм характер распределения степени заполнения поверхности по площади основания изменяется с переходом от многомодового к одномодовому. Следовательно, морфология поверхности с ростом толщины преобразуется в более однородную (рис. 5).

Из полученной топографии поверхности пленки SrTiO_3 можно сказать, что поверхность пленки является достаточно ровной. Наблюдаемые морфологиче-

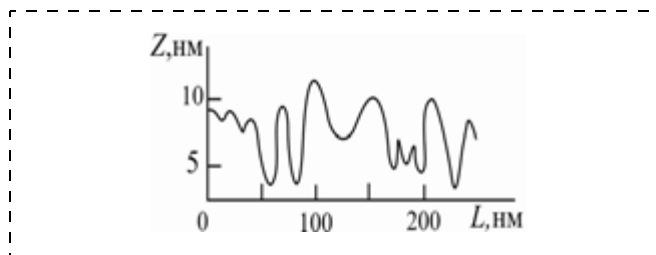


Рис. 5. Топография поверхности пленок SrTiO_3 :

Z — высота рельефа поверхности; L — расстояние в боковом направлении

ские изменения свидетельствуют о протекании в тонком слое пленки интенсивных процессов полимеризации и структурообразования [11]. Таким образом, при формировании вакуумного наноразмерного пленочного слоя SrTiO_3 на холодной подложке образуется микроструктура с псевдозернами размерами $\sim 1\text{--}2$ нм. Межатомные расстояния Sr—O , O—O близки к средним межатомным расстояниям поликристаллической пленки.

При толщине ~ 12 нм образуются большие кластеры, а при толщине слоя ~ 6 нм происходит переход от многомодового к одномодовому. Неоднородная морфология поверхности с ростом толщины преобразуется в более однородную.

Список литературы

1. Поут Дж., Ту К., Мейер Дж. и др. Тонкие пленки: взаимная диффузия и реакции: Пер с англ. М.: Мир, 1982. 576 с.
2. Cristoveanu S. Silicon on insulator technology and devices: from present to future // Solid Stat electronics. 2001. N 45. P. 1403—1411.
3. Томашпольский Ю. Я., Платонов Г. Л. Сегнетоэлектрические пленки сложных окислов металлов. М.: Металлургия, 1978. 200 с.
4. Ezhilvalahan S., Tseng-Yseng. Progress in the development of (Ba, Sr) TiO_3 (BST) thin films for Gigabit DRAMS // Materials Chemistry and physics. 2000. V. 65. P. 227—248.
5. Агасиев А. А., Панахов М. М., Ахундов Ч. Г., Мамедов М. З. Получение пленок SrTiO_3 методом магнетронного ионного распыления из жидкой фазы // Proc. of NAHA TRANSACTIONS. Baku. 2006. Vol. XXVI, № 2. P. 110—114.
6. Agasiev A. A., Akhundov Ch. G., Eivazova G. M., Mamedov M. Z. Electro conductivity of SrTiO_3 films with integrand barriers. Physic B. North-Holland, 1990. 419 p.
7. Agasiev A. A., Akhundov Ch. G., Mamedov M. Z. Growth regularities and Electroconductivity of SrTiO_3 films obtained by magnetron sputtering // Proc. of XII European Conference "Investigation of surface", Sweden, Stockholm. 1991. 9—12 September.
8. Агасиев А. А. Формирование и электрофизические свойства пленок сложных металлооксидов: докт. диссертация. Баку. 1995.
9. Томашпольский Ю. Я. Пленочные сегнетоэлектрики. М.: Радио и связь, 1984. 191 с.
10. Вялых Д. В., Федосенко С. И. Исследование микрофотографии поверхностей SiO_2 и Si межфазной границы Si/ SiO_2 в структурах SIMOX методом сканирующей туннельной микроскопии // ФТТ. 1999. Т. 33. Вып. 6. С. 708—711.
11. Рогачев А. А., Саркисов О. А., Казаченко В. П. Использование многослойных и легированных покрытий на основе углерода для повышения ресурса мелкоразмерного инструмента и технологической оснастки // Сб. докладов 6-го Белорусского семинара по сканирующей зондовой микроскопии. Минск: Изд. ИТМО НАН Беларуси, 2004. С. 149—152.

УДК 621.315

А. В. Войцеховский¹, д-р физ.-мат. наук, проф.,
С. Н. Несмелов¹, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
Н. А. Кульчицкий², д-р техн. наук, проф.,
А. А. Мельников², д-р физ.-мат. наук, проф.,

¹ Томский государственный университет
 e-mail: vav@elefot.tsu.ru,

² Московский государственный институт
 радиотехники, электроники и автоматики
 (технический университет)
 e-mail: n.kulchitsky@gmail.com, a.melnikov@mirea.ru

ДЕТЕКТОРЫ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ Ge/Si ДЛЯ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

Рассмотрены вопросы создания новых типов детекторов на квантовых точках Ge/Si для инфракрасного диапазона: детекторы на основе p-i-n структур, биполярные и полевые фототранзисторы на основе квантовых точек Ge/Si. Потенциальные преимущества новых типов детекторов могут быть использованы при дальнейшем развитии технологий выращивания квантовых точек с заданными размерами, формой и плотностью.

Ключевые слова: инфракрасные детекторы, квантовые точки, квантовые ямы

Введение

Приборы на основе соединений кремния и германия все шире применяют в последнее время. Известны разработки микроболометров [1, 2], детекторов с внутренней фотоэмиссией [2, 4], детекторов с квантовыми ямами на основе силицида германия [5, 6]. В последние два десятилетия ведутся активные разработки новых типов инфракрасных детекторов на основе квантово-размерных структур. В настоящее время широко используются инфракрасные фотодетекторы на основе квантовых ям, в которых инфракрасное поглощение определяется межподзонами переходами [5–8]. Следует отметить, что инфракрасные фотодетекторы на основе квантовых ям не чувствительны к нормально падающему излучению вследствие правил отбора для оптических переходов и обычно имеют узкий спек-

тральный отклик в инфракрасной области [7]. Новым типом детекторов являются детекторы на квантовых точках. Для детекторов данного типа преодолены некоторые из проблем, типичных для инфракрасных детекторов на квантовых ямах [9]. Данная статья посвящена новым типам детекторов на основе силицида германия — детекторам на квантовых точках Ge/Si.

Детекторы на квантовых точках Ge/Si

В работе [10] рассмотрены различные типы детекторов для ближнего инфракрасного диапазона на основе квантовых точек Ge/Si, созданных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, и проанализированы их свойства с помощью нескольких методов. Целью исследований являлась разработка новых детекторных структур с германиевыми нановключениями, имеющих высокую эффективность детектирования в ближней инфракрасной области при комнатной температуре.

Излучению ближней инфракрасной области соответствует энергия возбуждения $h\nu$ (h — постоянная Планка, ν — частота излучения) для которой $E_{gGe} < h\nu < E_{gSi}$ (E_{gGe} — ширина запрещенной зоны германия, E_{gSi} — ширина запрещенной зоны кремния), что приводит к тому, что фотоны взаимодействуют только с квантовыми точками Ge и не взаимодействуют с нижележащими слоями Si. На рис. 1 показаны схематически два возможных типа меж-

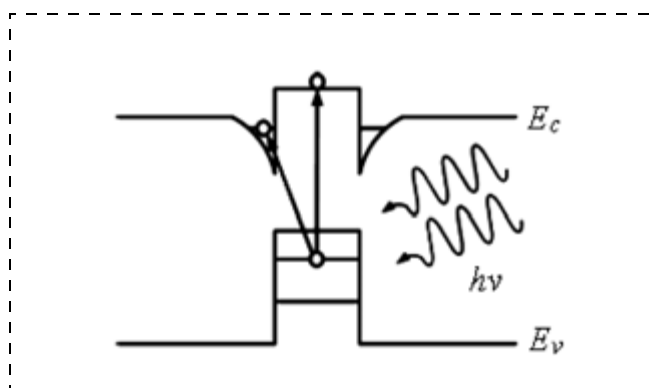


Рис. 1. Схематическое изображение энергетической зонной диаграммы, показывающее пространственно прямые и непрямые акты поглощения

зонных переходов при поглощении излучения собственным Ge/Si-детектором. Поскольку ширина запрещенной зоны в Ge много больше kT (тепловой энергии) при 300 К, то детекторы данного типа могут действовать при комнатной температуре.

Уменьшение потенциала в зоне проводимости кремния связано с напряжениями растяжения, которые расщепляют энергетические зоны. Поскольку в системе реализуется соединение зон второго типа, то возможны как пространственно прямые, так и не прямые переходы, как показано на рис. 1. Вследствие сплавления Ge и Si и эффектов квантового ограничения условие сохранения k ослабевает, и такие переходы могут происходить без участия фононов. Для работы прибора очень важно улучшить транспорт фотовозбужденных носителей, т. е. фотовозбужденные дырки должны давать вклад в фототок при выходе из потенциальной ямы за счет термоэлектронной эмиссии или полевой эмиссии при приложении достаточного напряжения. Поглощение фотонов улучшается при создании в кремниевой матрице нескольких слоев квантовых точек Ge, что приводит к увеличению коэффициента поглощения.

p-i-n-структуры. Наиболее хорошо изученный тип инфракрасного детектора основан на структуре *p-i-n*-фотодиода со слоями островков Ge, введенными в собственную область, как показано на рис. 2. В таких структурах легко обеспечить омические контакты путем создания высоколегированных контактных слоев, прямо соединенных с переходом. Диод *p-i-n*-типа с квантовыми точками имеет ряд преимуществ. Темновой ток обычно мал, поскольку такие приборы действуют при обратном смещении. Существует встроенное электрическое поле, что приводит к процессу разделения носителей. В принципе такие приборы могут действовать без внешнего

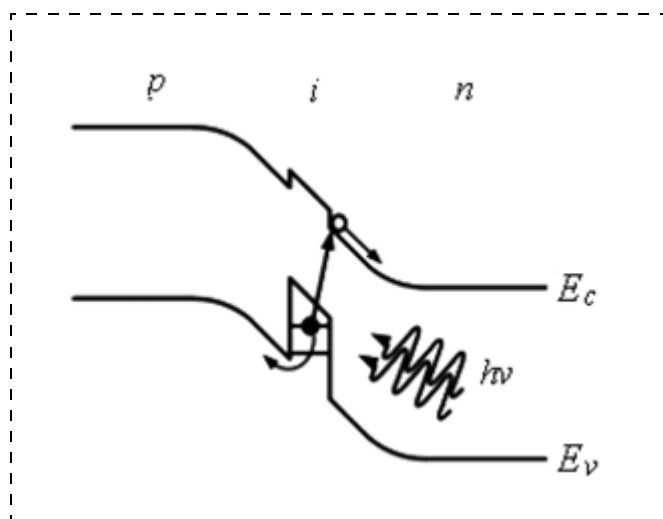


Рис. 2. Принцип работы *p-i-n*-фотодиода на основе квантовых точек Ge

напряжения, подобно солнечным элементам. Однако при приложении обратного смещения фотоносители разделяются более эффективно, и фототок увеличивается на определенное значение. Низкая вероятность выхода и перезахват дырок следующими слоями квантовых точек Ge в процессе транспорта являются проблемой, в частности при малом смещении, при котором наблюдается относительно малое время жизни. Захваченные в островках дырки также имеют повышенную вероятность рекомбинации с электронами, возможно через поверхность Ge/Si. Однако сообщенное в литературе значение фотоотклика для структур данного типа не очень велико, а эффект усиления фототока не наблюдался.

Предполагая отсутствие усиления фотопроводимости и нормальное падение излучения, можно записать теоретическое выражение для чувствительности в следующем виде:

$$R = \frac{\lambda}{1,24} (1 - \Theta_R) \eta_{\text{int}} (1 - \exp(-\alpha W)),$$

где λ — длина волны падающего излучения в вакууме, мкм; Θ_R — коэффициент отражения; W — толщина активной области; η_{int} — внешняя квантовая эффективность; α — коэффициент поглощения. Коэффициент отражения составляет примерно 0,3 для излучения ближней инфракрасной области, падающего нормально к поверхности кремния (30 % оптической мощности отражается без проникновения в прибор). Коэффициент $1 - \exp(-\alpha W)$ — доля фотонов, поглощенных в активной области. Если предположить, что отражательная способность очень мала, а коэффициент объемного поглощения так велик, что $\Theta_R = 0$, а αW принимает большое значение, то предельное теоретическое значение чувствительности составит $\lambda/1,24$. Это соответствует чувствительности около 1,05 А/Вт при длине волны 1,31 мкм и 1,25 А/Вт при 1,55 мкм, соответственно. Хотя эта ситуация недостижима на практике, но можно улучшить характеристики детектора путем оптимизации Θ_R , η_{int} и α . Использование антиотражающего покрытия, например, может уменьшить коэффициент отражения.

Значение αW , однако, относительно мало для инфракрасного детектора на квантовых точках Ge/Si при действии в режиме нормального падения излучения. Один фотон может встретить на своем пути максимум один островок в каждом слое квантовых точек, как показано на рис. 3. Если число слоев островков недостаточно велико, то значительная доля поступивших в прибор фотонов проходит через активную область без поглощения и попадает в кремний, с которым не взаимодействует.

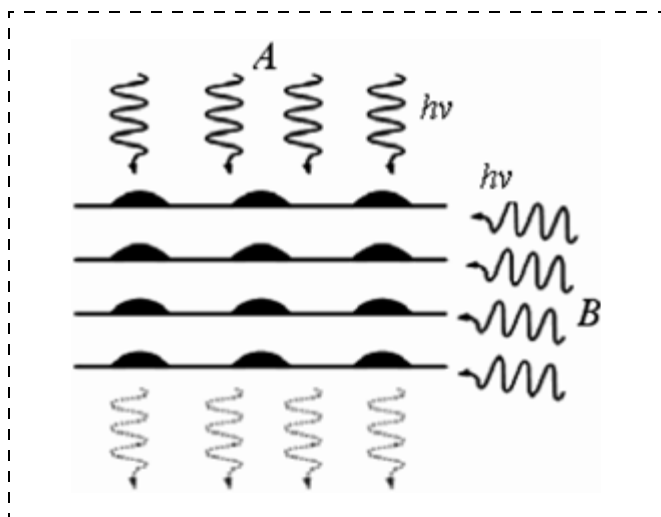


Рис. 3. Иллюстрация к геометрии при нормальном (А) и краевом (В) падении излучения

Этот недостаток может быть компенсирован использованием волноводной геометрии, т. е. при излучении, входящем через ребристый край детектора (рис. 3, В) с достаточно длинным оптическим путем, позволяющим фотонам распространяться вдоль слоев квантовых точек. Из того факта, что плотность островков составляет обычно $10^8 \dots 10^{11} \text{ см}^{-2}$ следует, что коэффициент поглощения увеличится и каждый фотон будет иметь возможность взаимодействовать с несколькими квантовыми точками в каждом слое. Для случая краевого падения теоретическое выражение для чувствительности близко к записанному выше выражению, но с дополнительным коэффициентом, характеризующим эффективность накопления. Увеличение коэффициента поглощения объясняется ростом значения W , которое сопоставимо с длиной прибора и потому намного превышает ширину активной области в детекторах, разработанных для режима нормального падения излучения.

Законченная технология волноводного детектора на квантовых точках Ge должна включать операцию создания материала с высоким показателем преломления (например, SiGe), следующего за активной областью, который ограничивает оптические моды вблизи слоев квантовых точек.

Существует другой метод улучшения характеристик детекторов. Приведенное выше выражение для фоточувствительности не отражает наличия любого усиления фотопроводимости. В фототранзисторах реализовано усиление фототока, которое приводит к тому, что коэффициент квантовой эффективности может превышать единицу. Фототранзисторы для ближней инфракрасной области на основе квантовых точек Ge, описанные в работе [10], основаны на двух типах детекторных структур, а именно на детек-

торах с биполярными фототранзисторами с гетеропереходом (НВТ) и с трехполюсными продольными полевыми фототранзисторами.

Биполярные фототранзисторы (НВТ-приборы). Характеристики разработанных приборов данного типа приведены, например, в работах [11, 12]. Преимуществом использования НВТ в качестве детектора (по сравнению с $p-i-n$ -фотодиодом) является возможность усиления фототока. Соответственно, фотоотклик увеличивается по сравнению с традиционным $p-i-n$ -фотодиодом. На рис. 4 показано схематическое изображение энергетической зонной диаграммы НВТ-фототранзистора с квантовыми точками Ge при поглощении излучения спектрального диапазона 1,3...1,55 мкм. Слои островков Ge вводятся для поглощения в область пространственного заряда перехода база—коллектор, эта область обратно смещена в нормальном режиме действия.

Падающее излучение ближнего инфракрасного диапазона поглощается посредством межзонного возбуждения в островках Ge, что приводит к генерации электронно-дырочных пар в обедненной области перехода база—коллектор, которые разделяются электрическим полем, существующим поперек перехода. Электроны вбрасываются в коллектор, а дырки движутся в область базы. Дырки, инжектированные в базу, дают вклад в ток базы, что ведет к усилению инжекции электронов из эмиттера через базу в коллектор, как описано ранее. Таким образом, усиливается первоначальный фототок, что также ведет к увеличению фотоотклика детектора.

На рис. 5 показано типичное расположение слоев в НВТ-детекторе. Выращивание начинается с эмиттера (сильно легированной n -области Si) со стороны подложки, последующего слоя p -SiGe толщиной 70 нм, содержащего 18 % Ge при концентрации примеси $1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Слои толщиной 5 нм с каждой стороны базы являются нелегированными

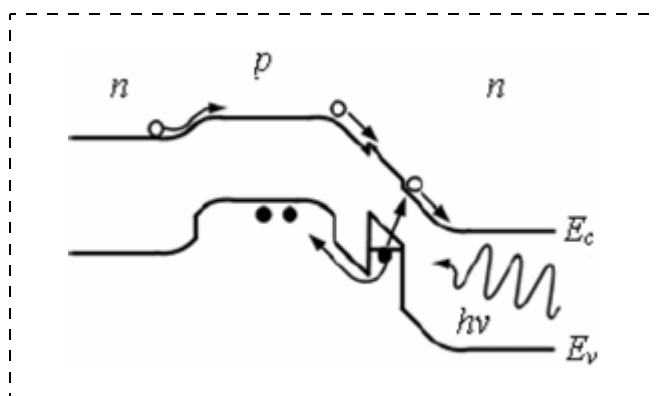


Рис. 4. Энергетическая зонная диаграмма и принцип действия НВТ-фототранзистора с квантовыми точками Ge. Слои островков вводятся в переход база—коллектор

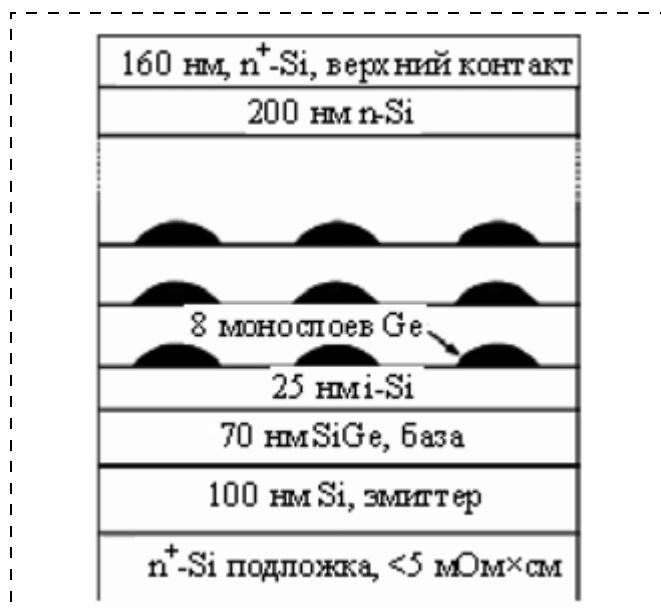


Рис. 5. Типичная структура слоев в НВТ-детекторе с квантовыми точками Ge. Вертикальное упорядочение изображено схематично и необязательно реализуется в разработанных приборах

для уменьшения диффузии примеси в нижележащий кремний. Десять слоев островков Ge (каждый — из восьми монослоев Ge) введены в собственную область перехода база—коллектор и разделены слоями Si толщиной 60 нм. Коллектор состоит из слаболегированного слоя n -Si, толщиной 200 нм, затем создается верхний слой n^+ -Si для омического контакта с уменьшенным последовательным сопротивлением.

Результаты исследований методом дифракции рентгеновских лучей Si(004) в интервале θ — 2θ (θ — угол скольжения) для описанной выше детекторной НВТ-структуры приведены в работе [10]. На рис. 6 показаны ВАХ НВТ-структуры размерами $0,5 \times 0,5$ мм при наличии освещения и без освещения. Очень малый темновой ток около $0,01$ мА/см² наблюдался при обратном смещении перехода база—коллектор ($V_{bc} = -2$ В). Напряжение пробоя между эмиттером и коллектором в режиме с открытой базой составляло -6 В. Модуляция фототока при изменении уровня входной оптической мощности наблюдалась только при обратном смещении перехода база—коллектор. Это означает, что поглощение фотонов происходит только в слоях островков Ge, введенных в переход база—коллектор.

Продольные МОП-фототранзисторы (FET-приборы). В продольных фототранзисторах используются три контакта для истока, стока и затвора, и эти приборы имеют сходство с приборами на основе полевых транзисторов (FET) и обычно называются FET-фототранзисторами. Принцип работы схож с таковым для типичных канальных полевых унипо-

лярных МОП-транзисторов (MOSFET). В работе [10] рассматривается разработка слоев и структуры фототранзисторов в плане оптимизации характеристик, и наиболее важной целью является влияние напряжения на затворе. Результаты разработки детекторов данного типа для ближней инфракрасной области приведены, например, в работе [13].

Основной принцип действия FET-фототранзистора с квантовыми точками Ge относительно прост. Островки Ge вводятся в область собственного Si. Поглощение излучения ближней инфракрасной области происходит в квантовых точках, фотоносители разделяются и дают вклад в фототок, обусловленный продольным электрическим полем между контактами истока и стока. Тем не менее длина канала слишком велика, в частности, вследствие ограничения ширины линии при фотолитографии, что приводит к относительно большому времени пролета. НВТ-фотодетекторы имеют общую длину около 1 мкм, а в продольных детекторах длина канала превышает 20 мкм. Кроме того, дискретность расположения островков Ge в плоскости делает транспорт носителей менее эффективным вследствие снижения подвижности носителей. К тому же транспорт через очень толстые смачивающие слои может быть затруднен рассеянием на поверхности. В результате разработка структуры слоев и конструкции прибора является более ответственной операцией для FET-детекторов в плане обеспечения высокой фоточувствительности. Изменение напряжения на затворе является единственным способом увеличения фототока.

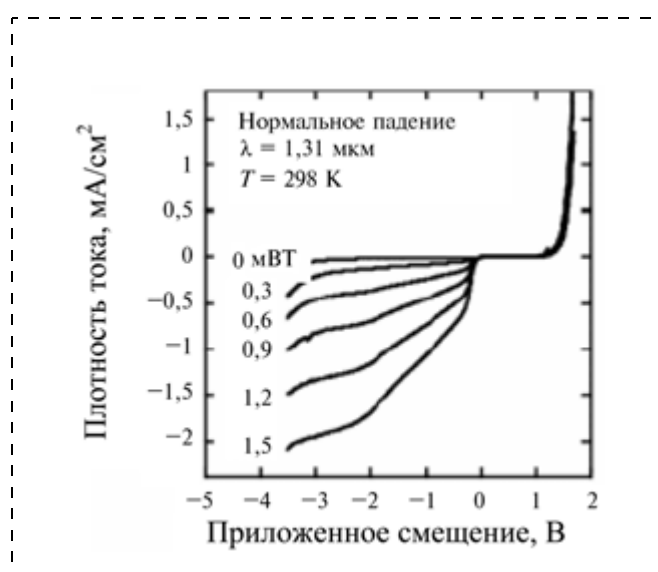


Рис. 6. Модуляция тока НВТ-фототранзистора с квантовыми точками Ge при изменении входной оптической мощности

Транспорт носителей становится более эффективным при создании квантовых ям из напряженного SiGe вблизи слоев квантовых точек Ge [14]. Разрыв валентной зоны ограничивает дырки в квантовой яме. Кроме того, увеличение подвижности в слоях напряженного SiGe также приводит к улучшению транспортных свойств. Сообщалось об успешной разработке детекторов "квантовые ямы SiGe — квантовые точки Ge" для среднего инфракрасного диапазона. Поскольку такие детекторы действуют при низких температурах, перенос дырок из квантовых точек в квантовые ямы осуществляется за счет туннельных процессов. Наблюдался высокий фототок при малом разделении квантовых ям и квантовых точек. Для детекторов ближнего инфракрасного диапазона перенос дырок может происходить как за счет полевой эмиссии, так и за счет термоэлектронной эмиссии, поскольку детекторы действуют при комнатной температуре. Приложенным напряжением смещения можно управлять этим процессом, а также временем жизни носителей вследствие изменения эффективности разделения носителей.

Толщина слоя SiGe и состав Ge являются двумя дополнительными параметрами, которые могут быть оптимизированы. Толщина не должна быть слишком малой, поскольку при этом усиливается рассеяние на поверхности. Теоретически желательна высокая концентрация Ge в 2D-слое, поскольку при этом увеличиваются напряжения, повышаются подвижность и изгиб зон. Этот слой может также вносить вклад в общий фототок за счет поглощения излучения, например при длине волны, равной 1,31 мкм. Однако формирование островков и релаксация решетки ограничивают максимальную концентрацию германия.

Островки Ge предпочтительно выращивать при низких температурах, поскольку это ведет к малым размерам, высокой плотности и высокому содержанию Ge в островках. Для минимизации перемешивания Si и Ge температура выращивания не должна превышать 500 °C. Поскольку основное перемешивание может происходить при выращивании кремния поверх слоя островков Ge, температура выращивания при создании первых 10 нм покрывающего слоя не должна превышать 370 °C. Затем температура постепенно увеличивается в течение выращивания дальнейшего покрывающего слоя кремния. Для уменьшения числа дислокаций и точечных дефектов скорость выращивания Ge и Si должна быть относительно низкой.

На рис. 7 показана схема расположения слоев для продольного FET-фототранзистора на основе квантовых ям SiGe и квантовых точек Ge. Все структуры созданы на основе 10 слоев квантовая точка/кванто-

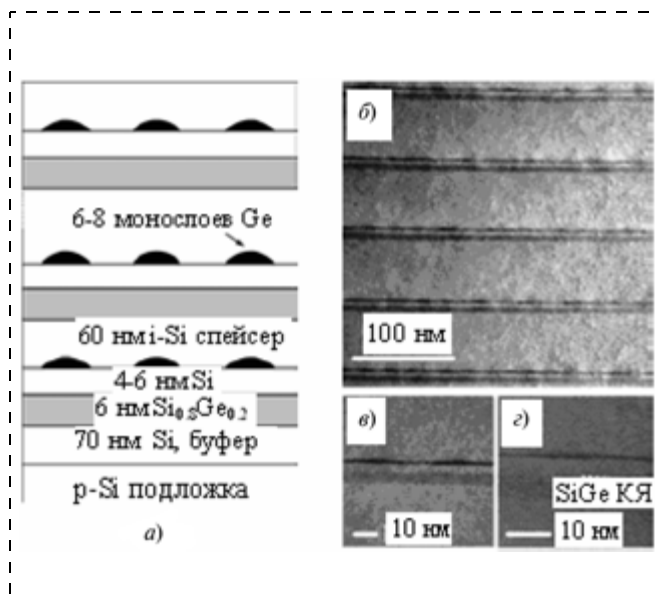


Рис. 7. Схематическое изображение структуры продольного фотодетектора на основе квантовых точек Ge (а) и микрофотографии, полученные методом поперечной пропускающей электронной микроскопии после выращивания (б—г)

вая яма, выращенных на слаболегированной подложке из Si(100). Слои SiGe имели толщину 6 нм и содержали 20 % германия. Между слоями квантовых ям и квантовых точек располагались слои собственного кремния толщиной от 4 до 10 нм. Номинальная толщина Ge в слоях островков также варьировалась для различных структур, в большинстве случаев эта толщина составляет 4 нм. Покрывающий кремниевый слой имел толщину 60 нм.

На рис. 7, б показана яркостная микрофотография, полученная методом поперечной пропускающей электронной микроскопии (ТЕМ), пяти периодов сверхрешетки одной детекторной структуры. Отчетливая и хорошо воспроизводимая структура не проявляет существенной корреляции между слоями островков, поскольку толщина кремниевых слоев составляет 70 нм, что превышает средний размер островка 20 нм. На рис. 7, в и 7, г показаны ТЕМ-изображения с высоким разрешением слоев квантовых ям/квантовых точек в одном и 10 периодах сверхрешетки, соответственно. Дислокаций внутри прибора не обнаружено.

Архитектура прибора имеет большое значение при создании FET-детекторов. Определим W как общую длину контактов истока и стока, а L — как длину канала, т. е. расстояние между электродами истока и стока. В принципе, больший объем поглощения реализуется при высоком значении W . Желательно, чтобы длина канала была малой для быстрого переноса носителей к контактам. Это увеличит как фоточувствительность, так и рабочую частоту прибора.

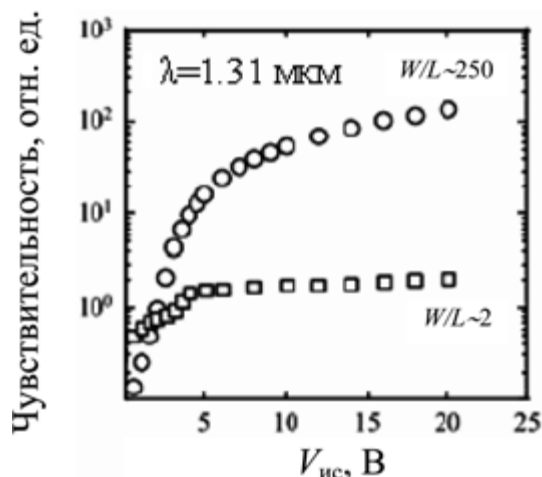


Рис. 8. Чувствительность в зависимости от напряжения между истоком и стоком для двух типов разработанных детекторов. Геометрический фактор W/L является одним из важнейших параметров в плане обеспечения высокой фоточувствительности

Для обеспечения эффективных характеристик прибора отношение W/L должно быть большим. При множественном гребенчатом типе контактов истока и стока это условие полностью выполняется. В таких разработках расстояние между контактами мало, а длина контактов пропорциональна числу зубцов в гребенчатом электроде. Различия в чувствительностях на длине волны 1,31 мкм у детекторов, созданных при $W/L = 2$ и $W/L = 250$, показано на рис. 8. При высоких напряжениях между истоком и стоком фотоотклик почти пропорционален отношению W/L .

Заключение

Быстрое развитие нанотехнологий в последнее десятилетие привело к созданию новых типов инфракрасных детекторов на основе квантовых ям SiGe/Si и квантовых точек Ge/Si. Использование детекторов новых типов очень перспективно, поскольку инфракрасные детекторы могут быть созданы с помощью высокоразвитой кремниевой технологии. В последние годы появились новые типы детекторов на квантовых точках Ge/Si: детекторы на основе $p-i-n$ структур, биполярные и полевые

фототранзисторы на основе квантовых точек Ge/Si. Потенциальные преимущества новых типов детекторов могут быть использованы при дальнейшем развитии технологий выращивания квантовых точек с заданными размерами, формой и плотностью.

Список литературы

1. Moor P.-D., Kavadias S., Leonov V., Van Hoof C. Process development of fast and sensitive poly-SiGe microbolometer arrays // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4228. P. 94–99.
2. Liang D., Yue R.-F., Liu L.-T. Characterization of uncooled poly SiGe microbolometer for infrared detection // Chin. Phys. Lett. 2003. Vol. 20, № 5. P. 770–773.
3. Wada H., Nagahima M., Hayashi K. 512×512 element GeSi/Si heterojunction infrared FPA // Proc. SPIE. 1999. Vol. 3698. P. 584–595.
4. Tsaur B. Y., Chen C. K., Marino S. A. Heterojunction $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ infrared detectors and focal plane arrays // Optical Engineering. 1994. Vol. 33. N 1. P. 72–78.
5. Fromherz T., Nutz J. F., Hertle H., Helm M., Bauer G., Abstreiter G. Si/SiGe multiquantum wells: a route to infrared detectors // Vibrational spectroscopy. 1995. Vol. 8. P. 109–119.
6. Krapf D., Adoram B., Shappir J., Sa'ar A. Infrared multispectral detection using Si/SiGe $_{1-x}$ quantum well infrared photo detectors // Applied Physics Letters. 2001. Vol. 78, N 4. P. 495–497.
7. Рогольский А. Инфракрасные детекторы / Пер. под ред. А. В. Войцеховского. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
8. Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Новосибирск: Наука, 2001. 376 с.
9. Zhang C.-J., Shu Y. C., Yao J. H., Shu Q., Deng H. L., Jia J. Z., Wang Z. Q. Characteristics and developments of quantum-dot infrared photo detectors // Front. Phys. China. 2006. N 3. P. 334–338.
10. Elfving A. Near-infrared photodetectors based on Si/SiGe nanostructures // Linköping University, Sweden, 2006, Linköping Studies in Science and Technologies, Dissertation N 1003, 86 p.
11. Larsson M., Elfving A., Holtz P. O., Hansson G. V., Ni W.-X. Spatially direct and indirect transitions observed for Si/Ge quantum dots // Appl. Phys. Lett. 2003. N 82. 4785 p.
12. Elfving A., Larsson M., Holyz P.-O., Hansson G. V., Ni W.-X. Efficient near infrared Si/Ge quantum dot photodetector base on a heterojunction bipolar transistor // Material research society symposium proceedings. 2003. 770. P. I.2.2.
13. Elfving A., Hansson G. V., Ni W.-X. SiGe(Ge-dot) heterojunction phototransistor for efficient light detection at 1,3–1,55 μm // Physica. 2003. E16. 528 p.
14. Elfving A., Karim A., Hansson G. V., Ni W.-X. Three-terminal Ge-dots/SiGe quantum-well photodetectors for near-infrared light detection // Applied Physics Letters. 2006. 89. P. 083510-1–083510-3.
15. Elfving A., Hansson G. V., Ni W.-X. Ge-QD/SiGe-QW superlattice for near infrared photodetectors // Proc. of the Symposium on Si-based photonics: towards true monolithic integration, E-MRS, Strasbourg. 2004. May 24–28.

И. В. Ехменина, инженер,
Е. П. Шешин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Н. Н. Чадаев, канд. физ.-мат. наук, доц.,
 Московский физико-технический институт
 (государственный университет, г. Долгопрудный)
 e-mail: ehmenina@mail.ru

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ АВТОКАТОДОВ

Рассматривается возможность создания принципиально новых источников света общего назначения, основанных на катодолюминесценции под действием электронов, эмитируемых автокатодом из наноструктурированного углеродного материала.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, автокатод, люминофор, спектральные характеристики, ультрафиолет

Введение

В настоящее время остро стоит проблема разработки и широкого применения энергосберегающих, экологичных и долговечных источников излучения. На данный момент в продаже имеется множество различных источников света: ультрафиолетовые ртутные и эксимерные лампы, лампы накаливания, энергосберегающие лампы, а также приобретающие популярность лампы на светодиодах.

Лампы всех этих видов имеют ряд существенных особенностей. Так, некогда популярные лампы накаливания, несмотря на обрушившийся на них в последнее время поток критики, обладают множеством положительных качеств: небольшими размерами, простотой эксплуатации и утилизации, привычным для глаз спектром излучения, небольшой стоимостью. Вместе с тем, очевидны и недостатки данных источников света: помимо низкого КПД лампы накаливания служат всего около 1000 ч, тогда как энергосберегающие лампы могут прослужить в 10 раз дольше и обладают высокой эффективностью. Однако энергосберегающие лампы характеризуются линейчатым спектром излучения и высокой инерционностью (время включения 1–3 с), что является существенными недостатками при применении их в повседневной жизни.

В последнее время все большую популярность приобретают лампы на основе светодиодов, основными преимуществами которых являются: высокая долговечность (более 100 000 ч) и низкое энергопотребление (около 10 % от потребления при использовании ламп накаливания). К недостаткам данных источников излучения относятся высокая стоимость

и низкая мощность. Кроме того, светодиоды обладают маленькой площадью излучательной поверхности и, следовательно, являются сосредоточенными источниками света, поэтому их использование в помещениях создает опасность ослепления от весьма яркого света и, как следствие, — ухудшение условий видимости. Это необходимо учитывать при проектировании осветительных установок и соответствующей осветительной арматуры.

Помимо проблемы создания источников света общего назначения (для освещения квартир, офисов и т. п.) важным направлением является разработка ультрафиолетовых источников излучения для конкретных областей: нефтехимии, медицины, лазерной техники, экологии и др. Широкоиспользуемые источники ультрафиолета (эксимерные, ртутные лампы) имеют ряд существенных недостатков, таких как: громоздкость конструкции, маленькая площадь излучательной поверхности, низкая эффективность, высокая стоимость, наличие экологически вредного вещества — ртути.

В связи с этим необходимой является разработка принципиально новых источников излучения в целях создания лампы, обладающей высокой световой эффективностью, большим сроком службы, а также являющейся максимально экологичной как в производстве и эксплуатации, так и при утилизации. К источникам излучения, удовлетворяющим данным характеристикам, можно отнести катодолюминесцентные лампы на основе углеродных автокатодов.

Принцип действия катодолюминесцентных ламп

Работа катодолюминесцентных источников излучения с автокатадами из углеродных волокон основана на явлении автоэлектронной эмиссии. Суть явления состоит в туннелировании электронов сквозь потенциальный барьер на поверхности тела. Такое туннелирование становится возможным за счет искривления потенциального барьера при приложении внешнего поля (рис. 1). В этом случае появляется область пространства вне тела, в которой электрон может существовать с той же полной энергией, которой он обладает, находясь в теле [1].

Катодолюминесцентный источник света представляет собой вакуумную лампу (рис. 2) с электронной пушкой и экраном, на который нанесен люминофор. Электроны, вылетевшие из катода под действием напряжения модулятора U_M , ускоряются анодным напряжением U_A . При столкновении с анодом электроны возбуждают свечение люминофора, спектральная характеристика которого зависит от химического состава используемого люминесцирующего вещества.

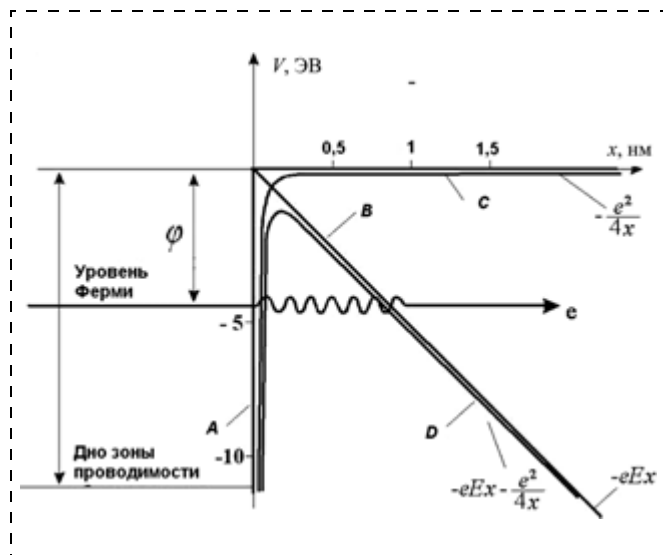


Рис. 1. Поверхностный потенциальный барьер на границе металл—вакуум в присутствии сильного электрического поля. Волнистая линия соответствует эффекту туннелирования электронов сквозь барьер

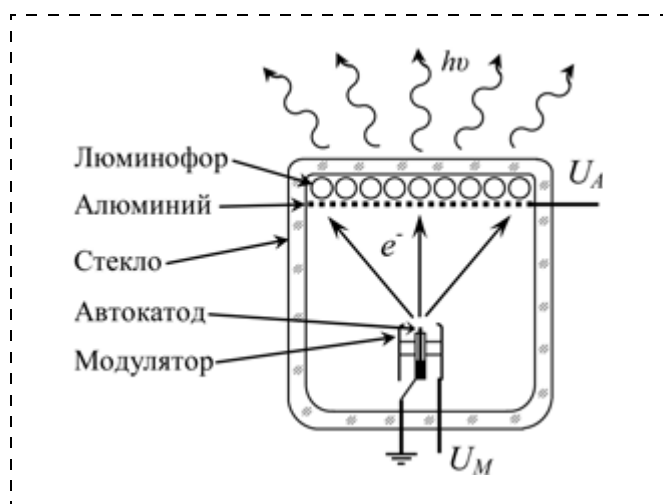


Рис. 2. Принципиальная схема работы катодолумinesцентного источника света с автокатодом

Полученные результаты

В качестве автокатада источника излучения в наших лабораториях используется пучок углеродных волокон (рис. 3).

Основная идея использования углеродных волокон состоит в том, что имеющая место в условиях технического вакуума ($\sim 10^{-6}$ Торр) относительно интенсивная бомбардировка рабочей поверхности катода ионами остаточных газов создает и поддерживает в динамическом режиме развитый рельеф, содержащий многочисленные эмитирующие центры высокой кривизны. Эмиссионными центрами у такого вида автокатада являются многочисленные микровыступы, образованные выходящими на торцевую поверхность волокна фибриллами и их сово-

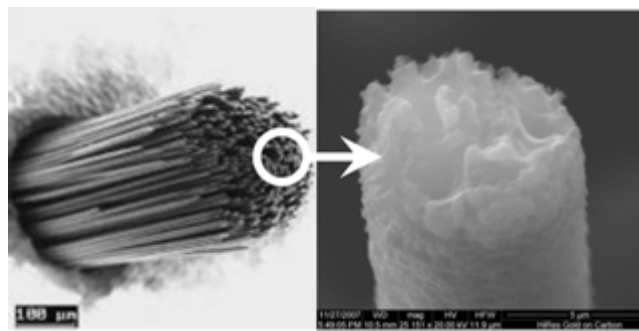


Рис. 3. Автокатод из углеродных волокон

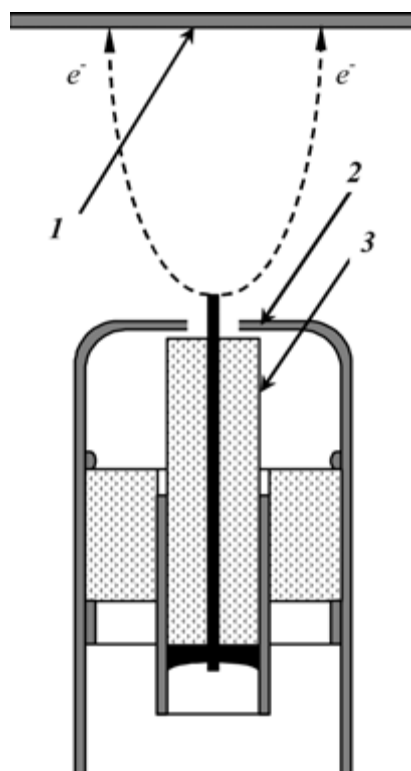


Рис. 4. Катодно-модуляторный узел:

1 — анод с люминесцентным покрытием; 2 — модулятор; 3 — автокатод

купностями. При работе автокатада из углеродных волокон в катодолумinesцентной лампе происходит разрушение отдельных эмиссионных центров катода под действием ионной бомбардировки, пондеромоторных нагрузок, разогрева микровыступов эмиссионным током, адсорбционно-миграционных процессов. Однако на месте разрушенных эмиссионных центров автоматически вследствие структурного строения углеродного волокна образуются новые эмиссионные центры. Поэтому эмитирующая

поверхность автоэлектронного катода из углеродных волокон, несмотря на действие разрушающих факторов, имеет тенденцию к самовосстановлению. Восстановление эмиссионных центров обеспечивает высокую стабильность эмиссионного тока и большой срок службы автокатаода и катодолюминесцентных ламп в целом. Использование пучков из 300—400 волокон позволяет получить ток до 200—500 мкА при удовлетворительной стабильности. Катоде из углеродных волокон без существенной деградации эмиссии выдерживают вакуумные пробои, что недопустимо для подавляющего большинства других типов автокатаодов [2].

Таким образом, несомненными преимуществами автоэмиссионного источника излучения являются экологичность, широкий диапазон рабочих температур, высокая устойчивость к механическим вибрациям и колебаниям напряжения в сети, низкая инерционность (время "электрического" включения катода не превышает 10^{-8} с) и высокая долговечность. Также необходимо отметить, что благодаря применению автокатаода источник не имеет греющихся частей. Несмотря на активную конкуренцию в данной области подобных технологий пока нет нигде в мире.

На базе автоэлектронного катода разработана электронная оптическая система катодолюминесцентной лампы. Основой данной оптической системы является катодно-модуляторный узел (рис. 4), состоящий из автоэмиссионного катода (остеклованный пучок углеродных волокон) и вытягивающе-

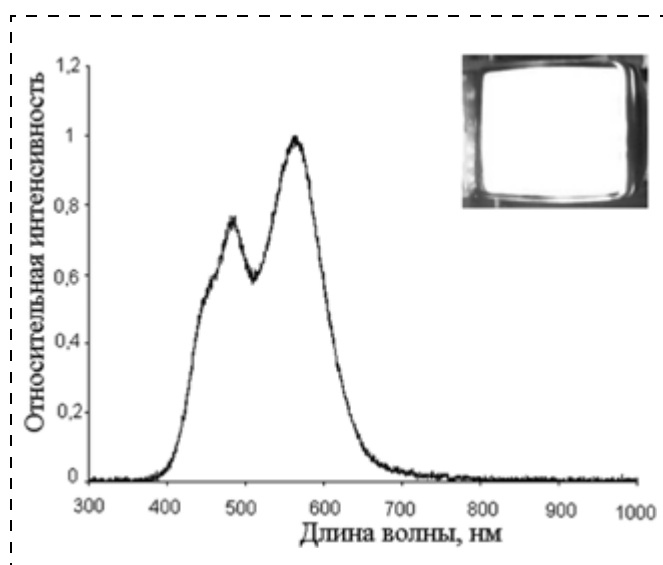


Рис. 6. Фотография и спектр излучения лампы белого света

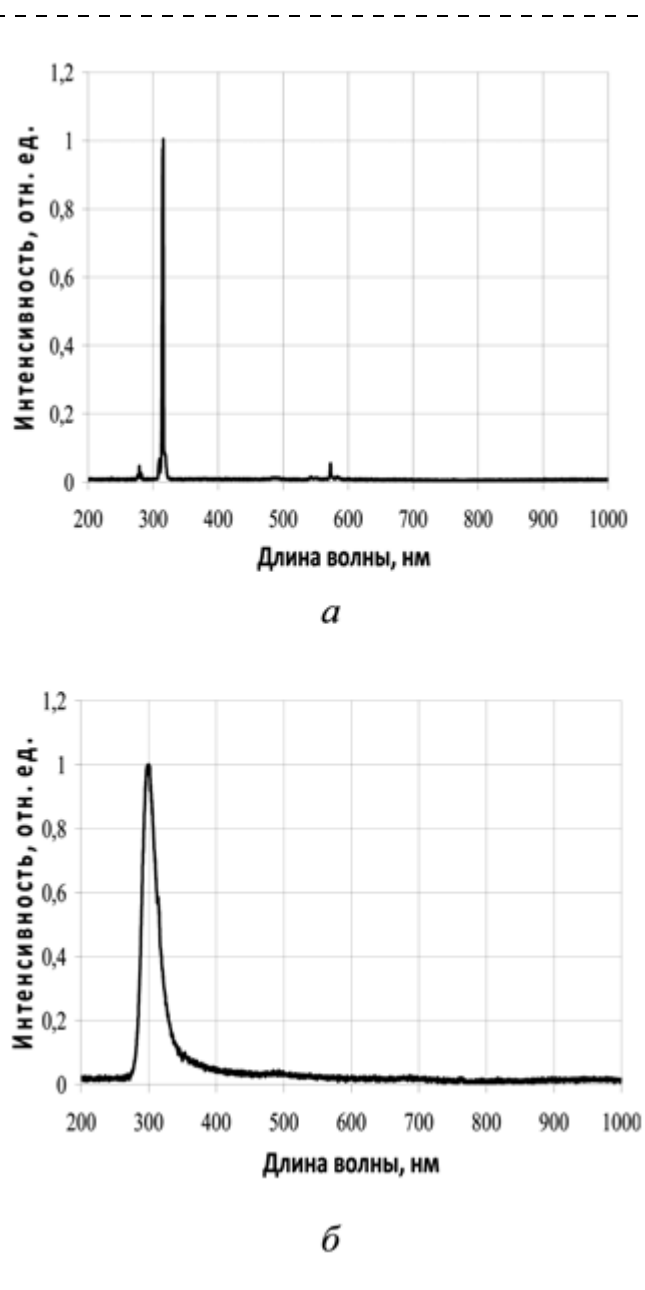


Рис. 8. Спектральное распределение излучения ультрафиолетовых люминофоров:

а — экспериментальный люминофор ПЛАТАН КЛ-УФ 752 (напряжение на аноде 10 кВ, напряжение на модуляторе 1 кВ, ток анода 40 мкА); *б* — экспериментальный люминофор ПЛАТАН 1677 (напряжение на аноде 10 кВ, напряжение на модуляторе 1 кВ, ток анода 120 мкА)

го электрода, выполненного в данном случае в виде металлической диафрагмы.

Практически эффективность данной электронно-оптической системы достигает 100 %, благодаря снижению напряжения на управляющем катоде (600—800 В при токе катода порядка 100 мкА), появилась возможность управления такими лампами, так как можно использовать уже существующие в продаже высоковольтные транзисторы. Разработанные нами прототипы катодолюминесцентных

источников света и их спектральные характеристики представлены на рис. 5 (см. вторую сторону обложки) и рис. 6.

Также была проведена подготовительная работа по изучению спектрального состава излучения ультрафиолетовых люминофоров, для последующей разработки ультрафиолетовой лампы на основе автокатодов (рис. 7, см. вторую сторону обложки и рис. 8).

Предлагаемые источники излучения не только сопоставимы по параметрам с наилучшими современными образцами, но превосходят их по равномерности свечения, низкой цене производства, ширине рабочего диапазона температур ($-196 \div +150$ °С), использованию в производстве недорогих, доступных, широко распространенных в природе и экологически чистых материалов и тех-

нологий. Также следует отметить, что все материалы, технология и разработки — российские, т. е. независимы от внешних поставок, поэтому возможна организация массового изготовления таких ламп, которые могут обеспечить не только российский рынок, но и мировой.

Список литературы

1. Шешин Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Изд. МФТИ, 2001. 287 с.
2. Лешуков М. Ю., Чадаев Н. Н., Шешин Е. П. и др. Католюминесцентные источники света с автокатадами из углеродных волокон // Матер. конф. "Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология". М.: Тровант, 2002.

УДК 531.787.084.2:629.735

Е. М. Белозубов, канд., техн. наук, нач. группы, ОАО "НИИ физических измерений", г. Пенза
e-mail: niifi@sura.ru

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ЕМКОСТНЫЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С МОНОЛИТНЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

Рассмотрены тонкопленочные емкостные микроэлектромеханические системы с монокристаллическим диэлектриком. Показаны преимущества и недостатки различных вариантов построения таких систем.

Ключевые слова: тонкопленочные емкостные микроэлектромеханические системы, монокристаллический диэлектрик

Как известно, тонкопленочные емкостные микроэлектромеханические системы (ТЕМЭМС) с массивным диэлектриком [1] по сравнению с ТЕМЭМС с тонкопленочным диэлектриком имеют преимущество по стойкости к воздействию повышенного электрического напряжения и повышенной температуры. Наиболее ярко эти преимущества проявляются в ТЕМЭМС с массивным недеформируемым диэлектриком [1]. Такие ТЕМЭМС называют ТЕМЭМС с монокристаллическим диэлектриком.

Повышение электро- и термостойкости ТЕМЭМС с монокристаллическим диэлектриком в основном объясняется возможностью увеличения толщины и улучшения структуры диэлектрика. Например, при использовании монокристаллического диэлектрика толщиной 500 мкм электрическая прочность ТЕМЭМС уве-

личивается примерно в 100 раз по сравнению с применением тонкопленочного диэлектрика, толщина которого по определению не может быть более 5 мкм. Кроме того, возможность изготовления монокристаллического диэлектрика независимо от других элементов ТЕМЭМС позволяет использовать диэлектрики с более совершенными структурами и характеристиками [1].

В то же время в связи с необходимостью изготовления упругого элемента (УЭ) из материалов, отличающихся от материалов диэлектрика, независимое изготовление последнего требует специальных способов присоединения его к УЭ. В зависимости от условий эксплуатации ТЕМЭМС и технологических возможностей для присоединения диэлектрика и УЭ можно использовать диффузионную сварку, прецизионную пайку, электростатическое соединение, соединение с помощью стеклоцемента, механическое закрепление и т. д.

Недостаточная технологичность и надежность известных ТЕМЭМС для высоких температур, в частности, вызвана наличием избыточного числа элементов с ограниченной надежностью и технологичностью, таких как гермопроходник, тонкие выводные проводники и т. п., а также сложностью и большим количеством межэлементных связей с ограниченной надежностью и технологичностью — различного рода конструкционных сварок, микросварок выводных проводников. Эти недостатки в значительной степени преодолены в разработанных ТЕМЭМС с монокристаллическим диэлектриком. В дополнение к предложенной классификации [1] среди ТЕМЭМС с монокристаллическим диэлектриком, в частно-

сти, можно выделить ТЕМЭМС с монолитным диэлектриком и герметичными выводными проводниками, ТЕМЭМС с монолитным диэлектриком, выводными проводниками в металлической оболочке и облегченным жестким центром, ТЕМЭМС с монолитным диэлектриком, выводными проводниками в металлической оболочке и дополнительно напряженными жесткими центрами, ТЕМЭМС с раздельным монолитным диэлектриком.

ТЕМЭМС с монолитным диэлектриком и герметичными выводными проводниками

На рис. 1 изображена ТЕМЭМС, в которой гермовыводы выполняют функцию выводных проводников, а гермопроходник — функцию пластины для размещения электродов. Она содержит упругий элемент 1 в виде мембраны с жестким центром 2, выполненной за одно целое с опорным основанием 3. Подвижный электрод 4 измерительного конденсатора расположен на диэлектрике в области жесткого центра. Неподвижный электрод 5 опорного конденсатора размещен на диэлектрике в области опорного основания. Зеркально-симметричные относительно электродов 4 и 5 неподвижные электроды 6 и 7 соответственно измерительного и опорного конденсаторов расположены на диэлектрике пластины 8. Гермопроходник 9 выполнен за одно целое с пластиной [2].

Диэлектрик УЭ выполнен в виде монолитной пластины 10 с жестким центром 11, расположенной зеркально-симметрично УЭ. Диэлектрик пластины

8 выполнен в виде монолитной пластины 12 с отверстиями 13, расположенными соосно контактам гермопроходника 9. Контакты гермопроходника частично выполнены в виде полос 14 толщиной, равной значению межэлектродного зазора, полосы частично расположены между диэлектрическими пластинами. При этом каждый из контактов одной из своих поверхностей расположен на одной из контактных площадок 15 соответствующего электрода. УЭ и пластина герметично соединены по периферии с деформацией в пределах упругости монолитных пластин и выводов с помощью втулки 16.

При воздействии на ТЕМЭМС повышенной температуры вследствие применения монолитных диэлектрических пластин электрическое сопротивление изоляции и тангенс диэлектрических потерь между электродами и токопроводящими элементами конструкции (УЭ, пластиной) сохраняются более длительное время. Анализируя рис. 1 и учитывая, что толщина электродов более чем на порядок меньше толщины контактов, получим исходное выражение для оптимизации соотношений размеров ТЕМЭМС в нормальных климатических условиях [2]:

$$l_b = l_{\pi} + l_{д.п} + l_{пр} + l_{д.п} + l_{уэ}, \quad (1)$$

где l_b — высота втулки (корпуса); l_{π} , $l_{д.п}$, $l_{пр}$, $l_{уэ}$ — толщина пластины, диэлектрической пластины, проводника, УЭ, соответственно.

С точки зрения минимизации размеров и учитывая идентичность требований к электрической изоляции для различных электродов, толщину монолитных пластин целесообразно брать одинаковой. Тогда выражение (1) можно представить в виде:

$$\alpha_b = \alpha_{\pi} + 2\alpha_{д.п} + \alpha_{пр} + \alpha_{уэ}. \quad (2)$$

Для обеспечения надежного контактирования выводов и контактных площадок электродов необходимо, чтобы термическое расширение втулки было равно суммарному термическому изменению отдельных элементов конструкции:

$$l_b \alpha_b \Delta T = l_{\pi} \alpha_{\pi} \Delta T + 2l_{д.п} \alpha_{д.п} \Delta T + l_{пр} \alpha_{пр} \Delta T + l_{уэ} \alpha_{уэ} \Delta T, \quad (3)$$

где α_{π} , $\alpha_{д.п}$, α_b , $\alpha_{уэ}$, $\alpha_{пр}$ — температурный коэффициент линейного рас-

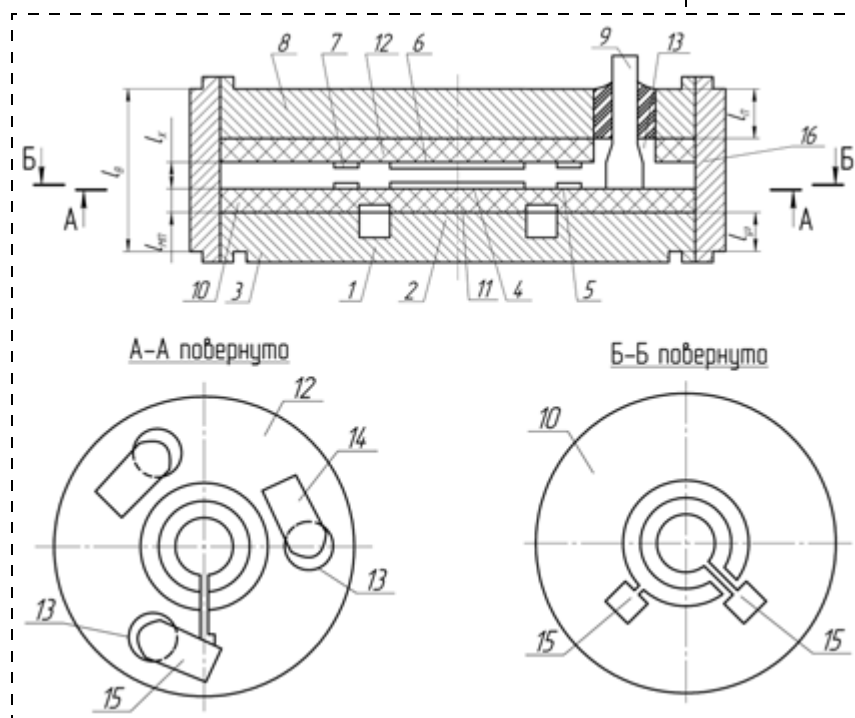


Рис. 1. ТЕМЭМС с монолитным диэлектриком и герметичными выводными проводниками

ширения (ТКЛР) пластины, диэлектрической пластины, втулки, УЭ, проводника, соответственно.

Отсюда после преобразования и деления обеих частей выражения (3) на ΔT получим

$$I_{\Pi} = \frac{2I_{\text{д.п}}(\alpha_{\text{в}} - \alpha_{\text{д.п}}) + I_{\text{пр}}(\alpha_{\text{в}} - \alpha_{\text{пр}}) + I_{\text{УЭ}}(\alpha_{\text{в}} - \alpha_{\text{УЭ}})}{\alpha_{\Pi} - \alpha_{\text{в}}} \quad (4)$$

Выражение (4) показывает возможность оптимизации характеристик за счет выбора размеров элементов конструкции. ТЕМЭМС в соответствии с предлагаемым решением работоспособны при температуре измеряемой среды 1000 К в течение 10 циклов по 1 часу [2].

ТЕМЭМС с монолитным диэлектриком, выводными проводниками в металлической оболочке и облегченным жестким центром

ТЕМЭМС (рис. 2) содержит корпус 1, в котором размещены УЭ в виде мембраны 2 с жестким центром 3, выполненной за одно целое с опорным основанием 4, круглый подвижный электрод 5 измерительного конденсатора, расположенный на диэлектрике в области жесткого центра, кольцевой неподвижный электрод 6 опорного конденсатора, размещенный на диэлектрике в области опорного основания. Зеркально симметричные неподвижные электроды измерительного 7 и опорного 8 конденсаторов, расположены на диэлектрике пластины 9, закрепленной с зазором на упругом элементе. Функцию выводных проводников выполняют кабели 10 в герметичной оболочке, жилы 11 которых соединены с контактными площадками 12 соответствующих электродов. Диэлектрики УЭ и пластины выполнены в виде круглых монолитных пластин 13 и 14 соответственно, диаметр которых равен диаметрам УЭ и пластины. На монолитной пластине УЭ выполнен жесткий центр 15 и опорное основание 16, расположенные зеркально-симметрично жесткому центру и опорному основанию УЭ. Пластина 9 выполнена за одно целое с корпусом 1. В корпусе выполнена внут-

ренняя полость диаметром, равным диаметру УЭ, и три радиальных равномерно расположенных по периметру отверстия 17, продольные оси которых размещены в плоскости, равноудаленной от плоскостей подвижного и неподвижного электродов измерительного конденсатора. В отверстиях герметично закреплены, например, с помощью непрерывной лазерной сварки кабели в герметичной оболочке, торцы которых защищены герметизирующим материалом 18. Токоведущие жилы частично выполнены толщиной, равной значению межэлектродного зазора. Торцевой корпус жестко соединен с помощью аргонодуговой сварки по периферии с торцом УЭ с предварительной деформацией в пределах упругости части токоведущих жил, заключенных между диэлектрическими пластинами. Жесткие центры УЭ и его диэлектрической пластины выполнены в виде колец. Диэлектрические пластины изготовлены из алюмооксидной керамики ВК100-1. Электроды выполнены в виде структуры ванадий—никель. Общая толщина структуры 1 мкм. В качестве кабеля с герметичной оболочкой применен нагревостойкий кабель в металлической оболочке с минеральной изоляцией и никелевой токопроводящей жилой типа КНМСН. В качестве герметизирующего материала используется стеклокерамика СК-100. Значение межэлектродного зазора равно 50 мкм [3].

Способ изготовления реализуется следующим образом. Полируют диэлектрические пластины со сторон размещения электродов до шероховатости не более 0,05...0,1 мкм. Электроды формируют на поверхности диэлектрических пластин методами тонкопленочной технологии. Помещают диэлектрическую пластину с неподвижными электродами в корпус. Вводят кабели в отверстие корпуса таким образом, чтобы их расплюснутые токоведущие жилы касались с одной стороны контактной площадки соответствующего электрода, а с другой стороны — диэлектрика. Кабели герметично закрепляют в отверстиях корпуса с помощью лазерной сварки. Внутрь корпуса помещают диэлектрическую пластину УЭ и УЭ с одновременной их ориентацией и фиксацией

аналогично диэлектрической пластине с неподвижными электродами. Прижимают УЭ к пластинам усилием, равномерно распределенным по периферии, и приваривают торец УЭ к торцу корпуса при воздействии этого усилия [3].

Преимуществом предлагаемого решения является повышение технологичности и надежности за счет уменьшения числа операций с конечным выходом годных и ограни-

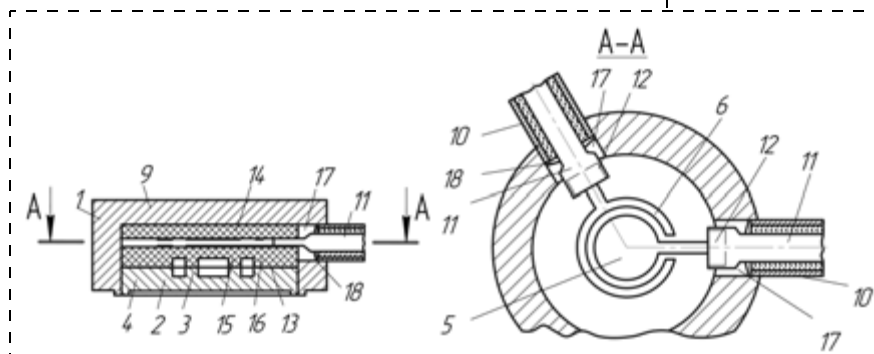


Рис. 2. ТЕМЭМС с монолитным диэлектриком, выводными проводниками в металлической оболочке и облегченным жестким центром

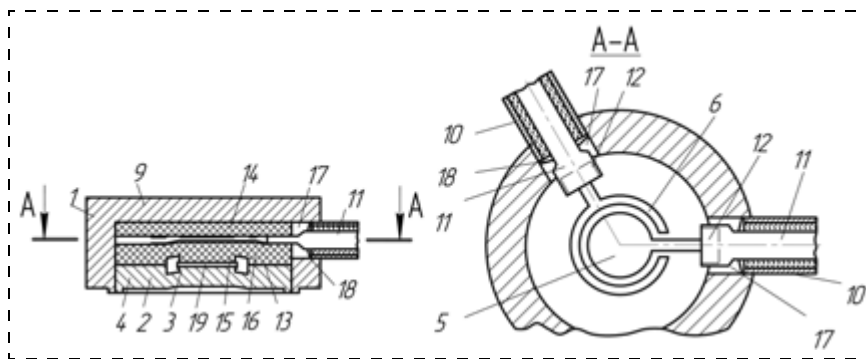


Рис. 3. ТЕМЭМС с монокристаллическим диэлектриком, выводными проводниками в металлической оболочке и дополнительно напряженными жесткими центрами

ченной надежностью (сварка выводных проводников с контактными площадками электродов и контактами колодки; изготовление и присоединение гермопроходника и т. д.).

ТЕМЭМС с монокристаллическим диэлектриком, выводными проводниками в металлической оболочке и дополнительно напряженными жесткими центрами

Результатом решения является улучшение динамических характеристик вследствие повышения собственной частоты и декремента затухания за счет повышения отношения изгибной жесткости мембраны к массе его жесткого центра, а также повышение устойчивости работы вследствие устранения "выхлопов" мембраны в результате предварительной деформации элементов конструкции.

Созданная ТЕМЭМС (рис. 3) состоит в основном из таких же элементов, что и приведенная на рис. 2, и отличается от рассмотренной ранее тем, что между торцами жестких центров УЭ и его диэлектрика расположена прокладка 19. Толщина прокладки h , толщина токопроводящих выводов A и толщина второй диэлектрической пластины H удовлетворяют соотношениям

$$h = 0,1\omega_0 + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3, A = \omega_0 + 0,5h + h_0; \quad (5)$$

$$H = H_0 \sqrt[3]{E_1(1-\mu_2^2)/E_2(1-\mu_1^2)}, \quad (6)$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ — максимальные суммарные отклонения формы и расположения поверхности соответственно мембраны, второй диэлектрической пластины и прокладки; E_1, μ_1, E_2, μ_2 — модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно материала мембраны и второй диэлектрической пластины [4].

Отличием способа изготовления является то, что перед прижатием мембраны ко второй диэлектрической пластине формируют в центральной части мембраны выпуклость размером $(0,6...1,0)(h + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3)$ [4].

Введение прокладки позволяет создать предварительное напряженное состояние УЭ и его диэлектрика, что повышает значение изгибной жесткости системы УЭ — диэлектрик, а следовательно, повышает собственную частоту и декремент затухания этой системы. Причем применение прокладки наиболее технологично, так как с помощью прокладки просто выставлять требуемый натяг (порядка нескольких микрон) на фоне размеров УЭ и его диэлектрика (порядка

нескольких миллиметров). Технологичность решения повышается также за счет снижения требований к точности доводки поверхностей жестких центров и опорных оснований УЭ и его диэлектрика, так как несовершенства этих поверхностей выбирают предварительным натягом [4].

ТЕМЭМС с раздельным монокристаллическим диэлектриком

В ТЕМЭМС с раздельным монокристаллическим диэлектриком (в отличие от рассмотренных выше ТЕМЭМС) диэлектрики жесткого центра и периферийного основания выполнены в виде непосредственно не связанных между собой элементов. Связь между этими элементами осуществляется, как правило, через другие элементы, например через мембрану. Такое построение ТЕМЭМС позволяет получить определенные преимущества, в частности, появляется возможность работы при прогибах мембраны, существенно превышающих допустимые прогибы монокристаллического диэлектрика. Кроме того, в таких решениях диэлектрик при воздействии измеряемого давления практически не испытывает деформаций, что благотворно сказывается на надежности и долговечности ТЕМЭМС, в том числе при воздействии широкого диапазона температур.

На рис. 4 изображена ТЕМЭМС с раздельным монокристаллическим диэлектриком. ТЕМЭМС содержит корпус 1, УЭ, выполненный в виде мембраны 2 с жестким центром 3 и опорным основанием 4. Диэлектрик УЭ изготовлен в виде раздельных пластин. Причем пластина, размещенная на жестком центре, выполнена в виде диска 5, а пластина, размещенная на опорном основании, — в виде кольца 6. На кольцо 6 с зазором относительно него закреплена диэлектрическая пластина 7. Электроды 8 и 10 измерительного конденсатора сформированы на диске 5 и пластине 7 соответственно. Кольцевые электроды 9 и 11 опорного конденсатора сформированы на кольце 6 и пластине 7 соответственно. Электроды соединены с гермовыводами 12 [5].

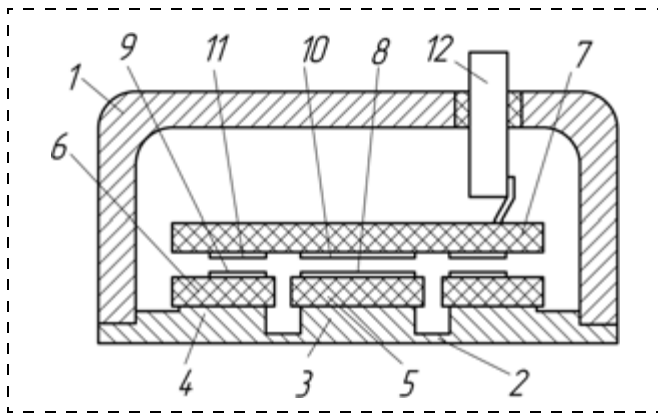


Рис. 4. ТЕМЭМС с раздельным монолитным диэлектриком

При изменении температуры эксплуатации на значение ΔT разность межэлектродных зазоров измерительного и опорного конденсаторов определяется выражением

$$\delta = H_d(1 + \alpha_d \Delta T) + H_{ж}(1 + \alpha_{ж} \Delta T) - H_k(1 + \alpha_k \Delta T) - H_o(1 + \alpha_o \Delta T), \quad (7)$$

где H_d — высота диска; $H_{ж}$ — высота жесткого центра; α_d — температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материала диска; $\alpha_{ж}$ — ТКЛР материала жесткого центра; H_k — высота кольца; H_o — высота опорного основания; α_k — ТКЛР материала кольца; α_o — ТКЛР материала опорного основания; ΔT — максимальное отличие эксплуатационной температуры от температуры нормальных климатических условий.

Для обеспечения идентичности изменения межэлектродных зазоров измерительного и опорного конденсаторов от воздействия температуры (при классическом алгоритме обработки выходного сигнала) необходимо, чтобы разность этих зазоров была равна нулю при всех температурах эксплуатации. Анализ выражения (7) показывает, что для выполнения этого условия необходимо, чтобы:

- эффективные размеры жесткого центра и опорного основания были одинаковы;
- толщина диска и кольца была одинаковой;
- материалы жесткого центра и опорного основания имели одинаковые ТКЛР и одинаковые характеры изменений ТКЛР от температуры;
- материалы диска и кольца имели одинаковые ТКЛР и одинаковые характеры изменения ТКЛР от температуры.

Эти условия обеспечиваются одновременной прецизионной механической и электрохимико-механической обработкой жесткого центра и опорного основания, а также диска и кольца. Для повышения электрической прочности за счет уменьшения вероятности пробоя по торцевым поверхностям диаметр диска 5 больше диаметра жесткого центра 3, а ширина кольца 6 больше ширины опорного основания 4. Размеры диска и кольца ограничены минимально допустимым зазором между ними. Оптимальное значение зазора между диском и кольцом определяется при $\alpha_d = \alpha_k = \alpha_{д.к}$ и $\alpha_{ж} = \alpha_o = \alpha_{уэ}$ соотношением [5]

$$L = L_0 + 0,5(D + C)(\alpha_{уэ} - \alpha_{д.к})\Delta T, \quad (8)$$

где L_0 — минимально допустимый зазор между диском и кольцом; D — диаметр диска; C — диаметр кольца; $\alpha_{уэ}$ — ТКЛР материала УЭ; $\alpha_{д.к}$ — ТКЛР материала диэлектрика диска и кольца.

Выражение (8) целесообразно применять в случае $\Delta T \geq 0$ и $\alpha_{уэ} \geq \alpha_{д.к}$, а также при $\Delta T \leq 0$ и $\alpha_{уэ} \leq \alpha_{д.к}$. В случае $\Delta T \leq 0$ и $\alpha_{уэ} \geq \alpha_{д.к}$, а также при $\Delta T \geq 0$ и $\alpha_{уэ} \leq \alpha_{д.к}$ целесообразно выбирать $L = L_0$.

ТЕМЭМС с раздельным механически закрепленным монолитным диэлектриком

ТЕМЭМС (рис. 5) содержит корпус 1, мембрану 2 с жестким центром 3, утолщенным периферийным основанием 4 и проточкой между ними. Первая диэлектрическая пластина 5 закреплена на мембране со стороны жесткого центра. Вторая диэлектрическая пластина 6 размещена в глухом отверстии корпуса на его торце 7 с зазором относительно первой диэлектрической пластины. При этом на обращенных друг к другу поверхностях пластин сформированы электроды 8—11 измерительного и эталонного конденсаторов, размещенные соответственно в области центра и периферий-

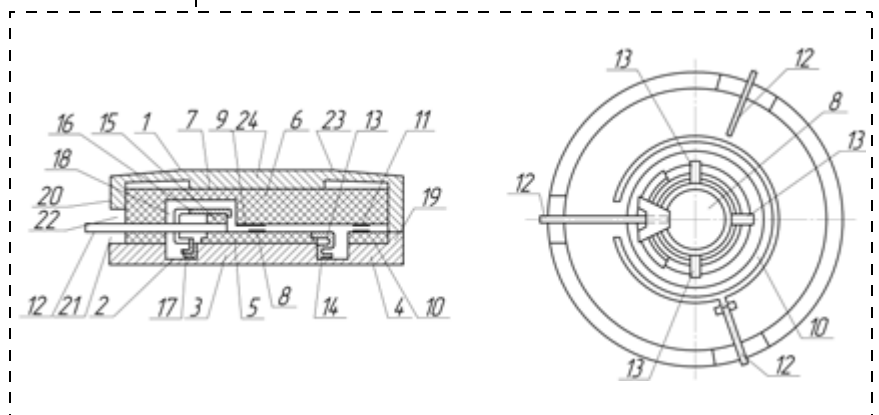


Рис. 5. ТЕМЭМС с раздельным механически закрепленным монолитным диэлектриком

ного основания. Токоподводящие выводы 12, контактирующие с соответствующими электродами, частично расположены между диэлектрическими пластинами. Первая диэлектрическая пластина выполнена в виде двух отдельных пластин, расположенных соответственно на жестком центре и периферийном основании.

Пластина, расположенная на жестком центре, прижата к нему упругими консолями 13, выполненными за одно целое с перпендикулярно расположенной им втулкой 14, боковая поверхность которой жестко закреплена с помощью лазерной сварки на боковой поверхности жесткого центра. Токоподводящий вывод, контактирующий с электродом 8 измерительного конденсатора, размещенным в области жесткого центра, прижат к электроду через введенную дополнительную диэлектрическую пластину 15, прижатую введенной дополнительной упругой консолью 16, которая выполнена за одно целое с перпендикулярно расположенным фрагментом дополнительной втулки 17, жестко закрепленной на боковой поверхности жесткого центра.

Во второй диэлектрической пластине напротив дополнительной консоли выполнена выемка 18. На боковой поверхности корпуса и на расположенном на периферийном основании выступе 19 и на боковой части 20 корпуса в областях размещения токоподводящих выводов выполнены пазы 21 и 22 соответственно. Торец корпуса выполнен в виде дополнительной мембраны 23 с жестким центром 24, деформированной в пределах упругости и жестко закрепленной, например, с помощью сварки, на торце выступа периферийного основания мембраны в областях отсутствия токоподводящих выводов [6].

При воздействии измеряемого давления жесткий центр 3 мембраны 2 и электрод 8 перемещаются в сторону электрода 9, поэтому емкость измерительного конденсатора, образованного электродами 8 и 9, увеличивается. Емкость эталонного конденсатора, образованного электродами 10 и 11, не зависит от измеряемого давления.

При повышении измеряемой температуры вследствие различных значений ТКЛР материалов мембраны, консолей 13, втулки 14 происходит различное термическое расширение элементов конструкции, но за счет деформации консолей это не вызывает повреждения или отслоения диэлектрической пластины, т. е. консоли компенсируют различные термические расширения элементов конструкции.

При повышении температуры происходит также различное термическое изменение размеров допол-

нительной диэлектрической пластины 15, консоли 16 и фрагмента втулки 17, но вследствие деформации консоли повреждения дополнительной диэлектрической пластины или ее отслоения не будет. Кроме того, при воздействии температуры происходит различное термическое расширение мембраны, корпуса и диэлектрических пластин, но вследствие деформации дополнительной мембраны разрушения диэлектрических пластин или изменения значения зазора между ними не будет. То есть мембрана с жестким центром играет роль компенсатора различных термических деформаций отдельных элементов конструкции ТЕМЭМС.

Выполнение первой диэлектрической пластины в виде двух отдельных пластин, расположенных соответственно на жестком центре и периферийном основании, устраняет трение между соприкасающимися поверхностями жесткого центра и первой диэлектрической пластины, что уменьшает нелинейность и гистерезис. Такое выполнение диэлектрика существенно повышает надежность и ресурс вследствие устранения изгибных деформаций в первой диэлектрической пластине.

ТЕМЭМС, выполненная в соответствии с предлагаемым решением, имеет гистерезис, не превышающий 0,05 %. Ресурс предлагаемой ТЕМЭМС при температуре измеряемой среды 1000 К составляет 10 ч. Более высокая рабочая температура была получена только у охлаждаемых структур. Таким образом, преимуществом решения является существенное повышение точности, надежности и ресурса за счет устранения изгибных деформаций диэлектрических пластин, за счет компенсации различных термических деформаций отдельных элементов конструкции.

Список литературы

1. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А. Тонкопленочные микромеханические системы и датчики на их основе // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 2. С. 33–39.
2. Белозубов Е. М. Емкостный датчик давления: а. с. СССР № 1727008. Оpubл. 15.04.92. Бюл. № 14.
3. Белозубов Е. М. Емкостный датчик давления и способ его изготовления: а. с. СССР № 1796930. Оpubл. 23.02.93. Бюл. № 7.
4. Белозубов Е. М. Емкостный датчик давления и способ его изготовления: а. с. СССР № 1839236. Оpubл. 25.07.93. Бюл. № 9.
5. Белозубов Е. М. Емкостный датчик давления и способ его изготовления: а. с. СССР № 1847357. Оpubл. 15.10.93. Бюл. № 11.
6. Белозубов Е. М., Белозубова Н. В. Емкостный датчик давления: пат. РФ № 2024832. Оpubл. 15.12.94. Бюл. № 23.

ОАО ИНИЦ «ПАТЕНТ»
предлагает
информационный продукт

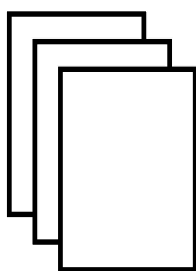


«ИЗОБРЕТЕНИЯ XXI ВЕКА» —

тематическую реферативную базу данных «**НАНОТЕХНОЛОГИИ**» на русском языке по изобретениям Великобритании, Германии, США, Франции, России, Швейцарии, Японии и международных организаций ВОИС и ЕПВ за 2003–2010 гг. с информационно-поисковой системой MIMOSA, которая позволяет проводить все виды патентных поисков.

Время получения результатов по запросу составляет от нескольких секунд до 1–2 минут.

Предлагаются также следующие издания:



— **Ненахов Г.С. и др.**

Нанотехнологии: существующие методы классифицирования и поиска патентных документов (практическое пособие);

— **Смирнов Ю.Г. и др.**

Патентование нанотехнологий в России;

— **Смирнов Ю.Г. и др.**

Алфавитно-предметный указатель к Международной патентной классификации по нанотехнологиям,

а также другие издания.

Адрес **ОАО ИНИЦ «ПАТЕНТ»**: 123995, ГСП-5, ул. Дружинниковская, д. 11А.

Тел.: (499) 255-13-52, тел./факс: (499) 252-06-96.

E-mail: inic_patent@mtu-net.ru.

Сайт в Интернете: <http://www.inicpatent.ru>

Rathkeen L. S. *Nanotechnological Projects and Prospective Products of the Russian Academy of Science* 2
In 2009 Russian academy of science (RAS), which celebrate the 286-th anniversary at 08.02.2010, organized specialized scientific sessions, on which, among the other questions, were discussed new projects and prospective products in the field of nanotechnologies. Much attention was paid for theoretical and practical aspects of projecting of nanoindustrial products and questions of cooperation of academician and institute science. Also were discussed the problems of commercialization of products in the field of nanoindustry and reducing the volume of financing of Federal Purpose Program (FPP) "The development of the infrastructure for the nanoindustry on 2008—2010".

Keywords: RAS, nanotechnologies, nanoindustry, FPP

Seleznov V. A., Prinz V. Ya., Korneev I. A. *Chips with Semiconductor Tube-Probes for Scanning Tunnelling Microscopy* 5

A method of mass production of chips with tubular $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ probes for scanning tunnelling microscopy (STM) is described. This method includes standard procedures of optical lithography and selective anisotropic etching of InP substrate, that leads to the formation of rolled-up tubes from strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ heterofilms and simultaneous formation of chips. Created chips with semiconductor tube-probes are promising for high-vacuum scanning tunnelling microscopy and spectroscopy, spin tunnelling microscopy and near-field microscopy applications.

Keywords: scanning tunnelling microscopy, semiconductor tube-probes, self-rolling of strained heterofilms

Girfanova N. A. *The Review and Comparison of Methods for Image Quality Detection in Passive Autofocusing Systems* 9

In the article analyzed the range of algorithms for calculation the parameter that characterizes the quality of image in passive autofocus systems. There are: discrete wavelet transform, discrete cosine transform, one-dimensional and two-dimensional gradient. The filtration is used for several methods. To test the algorithms special videodata that represent the most difficult autofocus situations have been used. Hardware requirements have been estimated for implementation in CMOS 0,18 micron technology.

Keywords: passive autofocus system, image sharpness

Cridchin V. A., Lobach O. V., Dikareva R. P. *Numerical Modeling of Microelectronic Heat Flux Sensor* . . 13

The paper presents a simplified thermal and finite-element models of microelectronic heat flux sensor, features of a design are discussed. Thermal resistance is defined and expressions for a target signal of a sensor control are received. It is shown that the numerical simulation accurately describes the characteristics compared with the analytical model. A comparison of model calculations with experimental data, which confirmed the correctness of models. The proposed numerical model allows the optimization of the characteristics of the sensor.

Keywords: sensor, heat flow, microelectronic technology, finite element method

Novikov S. G., Gurin N. T., Korneev I. V. *Simulation and Investigation Negation with the Transfer N-Shaped Current-Voltage Characteristics* 17

The paper presents a method of implementing embedded negatrons protection from current overload in the control circuit based on a combination of two elements with N-shaped volt-current characteristic. The features of appliances sold by this method are the existence of static output and transfer N-shaped CVC, as well as one or several chains of positive feedback, which allows to Limit the operating input current and output voltage within specified limits. Using this method will create a semiconductor structure with built-in protection against current overload in the control and load circuits.

Keywords: negatrons, negative resistance, the transfer characteristic

Grinkin E. A., Babayevsky P. G., Zhukova S. A., Zhukov A. A., Obizhaev D. Yu. *Effects of Regular Patterned Polyimide Surface Energy and Geometric Parameters on Water Sessile Drop Anisometry, Wetting Anisotropy and Contact Angle Hysteresis* 21

Behavior of water sessile drop on polyimide surface with different surface energy values and two types of regular microtextures was investigated. Energy and geometrical factors defining drop form and effective contact angle in dependence on direction relative to given surface microtexture symmetry axes and surface slope were identified.

Keywords: wetting, contact angle, polyimide, microstructured surfaces, specific free surface energy, anisotropy of wetting, wetting hysteresis, metastable state

- Sleptsov V. V., Tyanginsky A. Yu., Artjukhov S. A., Tserulev M. V.** *Definition of Concentration of Metals in Nanostructure Liquid Environments the Laser-Optical Method. Part 2. FUZZY Simulation.* 31
The task solution of construction of indistinct system of the conclusion modeling dependence of concentration of a solution of silver from its light passage is considered. The analysis of results of modeling in comparison with the significances received during accounts under the empirical formula is carried out, which is the best in a certain class of formulas in sense of minimization of a sum of squares of deviations from experimental data.
Keywords: fuzzy logic, fuzzy sets, empirical formulas, concentration, colloid solutions
- Smolin V. K.** *Liquid Nitrogen Use for Forming Microelectronic Structures* 34
There are considered the issues related to the low-temperature processing use in the process of forming micro-electronic structures. Efficiency of the processing in the liquid Nitrogen under cyclic effect is presented.
Keywords: low-temperature processing, material modification, heterostructure, defect rearrangement
- Agasiev A. A., Akhundov Ch. G., Mamedov M. Z., Sarmasov S. N., Mamedov H. M.** *Nanostructural and Morphological Properties of SrTiO₃ films* 36
The films of SrTiO₃ are obtained by the method of magnetron sputtering. The structure and morphology of the films are considered. The pseudo grain sizes on an average are determinate to be ~1–2 nm and are in good agreement with the area of coherent scattering. Interatomic distances Ti—O, Sr—O, O—O in disordered and polycrystalline films are estimated. The film surface is investigated by the atomic force and scanning electron microscopes.
Keywords: thin films, magnetron sputtering, SrTiO₃, surface morphology
- Voytsehovskiy A. V., Nesmelov S. N., Kulchitsky N. A., Melnikov A. A.** *Ge/Si Quantum Dot Detectors for an Infrared Range* 39
Questions of development of new types detectors on Ge/Si quantum dot for an infrared range are considered: detectors on a basis *p-i-n* structures, bipolar and field the phototransistor on the basis of quantum dot Ge/Si. Potential advantages of new types of detectors can be used at the further development of growth technologies of quantum dot with the set sizes, the form and density.
Keywords: infrared detectors, quantum dots, quantum well
- Ehmenina I. V., Sheshin E. P., Chadaev N. N.** *Light Sources on Basis of Nanostructured Field-Emission Cathodes* 45
This article considers possibility of creation of basically new light sources of the general purpose based on field-emission under action of electrons emitted from nano-structured cathode.
Keywords: field-emission, field-emission cathode, phosphor, spectral characteristics, photonic crystal, ultra-violet radiation
- Belozubov E. M.** *Thin-Film Capacitive Microelectromechanical Systems with the Monolithic Dielectric* 48
Thin-film capacitive microelectromechanical systems (TCMEMS) with the monolithic dielectric are considered. The strength and weakness of such systems are indicated.
Keywords: thin-film capacitive microelectromechanical systems (TCMEMS), the monolithic dielectric

For foreign subscribers:

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

The journal bought since november 1999.

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

ISSN 1813-8586.

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

E-mail: nmst@novtex.ru; <http://www.microsystems.ru>

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала **(499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru**

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер *Т. Н. Погорелова*. Технический редактор *Е. М. Патрушева*. Корректор *М. Г. Джавадян*

Сдано в набор 16.02.2010. Подписано в печать 17.03.2010. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,39. Заказ 297. Цена договорная

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