

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 9 ✧ 2005

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве
Отделения информационных технологий и вычислительных систем
Российской Академии наук

Издается с 1999 г.

Главный редактор

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В.
Асеев А. Л.
Васильев В. В.
Гапонов С. В.
Каляев И. А.
Климов Д. М.
Ковальчук М. В.
Лифшиц В. Г.
Мокеров В. Г.
Никитов С. А.
Чаплыгин Ю. А.
Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:

Антонов Б. И.
Астахов М. В.
Белоус А. И.
Быков В. А.
Васильев А. А.
Волчихин В. И.
Горнев Е. С.
Градецкий В. Г.
Гурович Б. А.
Журавлев П. В.
Захаревич В. Г.
Кальнов В. А.
Карякин А. А.
Квардаков В. В.
Кузин А. Ю.
Мокров Е. А.
Норенков И. П.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросянц К. О.
Петрунин В. Ф.
Путилов А. В.
Пятышев Е. Н.
Сауров А. Н.
Сигов А. С.
Степанов Ю. И.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Безменова М. Ю.
Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

- Мальцев П. П. О терминологии в области микро- и наносистемной техники 2
Вернер В. Д. К терминологии в микросистемной технике. 6
Варшавский А. Е. Показатели результативности науки России 8

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Стрельчук В. В., Валах М. Я., Гуле Е. Г., Коломыс А. Ф., Лисица М. П.,
Mazur Yu. I., Wang Z. M., Salamo G. I. Модификация свойств многослойных
наноструктур (In, Ga)As/GaAs с квантовыми нитями при термическом
отжиге. 10
Левонян Л. В. Формирование рентгеновского фазового контраста в условиях
дифракционной фокусировки сферической волны 18

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

- Карташев В. А., Бурухина Т. Ф. Исследование зависимости отклонений иглы
туннельного микроскопа от наклона его оси 21

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

- Бучин Э. Ю., Денисенко Ю. И. Использование процессов термомиграции
в технологии МЭМС. 29
Ламанов А. М., Ибрагимов Р. М., Никольский К. Н., Редькин А. Н.,
Чёсов Р. Г., Шешин Е. П. Автоэмиссионные катоды, изготовленные
методом низкотемпературного газофазного осаждения из паров этанола . . . 34

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

- Градецкий В. Г., Князьков М. М., Кравчук Л. Н., Семенов Е. А. Методы
движения миниатюрных управляемых внутритрубных роботов 37

СТРАНИЧКА РФФИ 43

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ 45

ИНФОРМАЦИЯ. 53

Представляем книги 55

Contents 56

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК России

Аннотации статей журнала на русском и английском языках и требования к оформлению
статей доступны на сайте журнала: <http://www.microsystems.ru>.

ПОДПИСКА:

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

УДК 621.3.049

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф.,
МИРЭА
microsystems@caravan.ru

О ТЕРМИНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Рассматривается терминология в области микро- и наносистемной техники с учетом сложившихся понятий и сокращений, принятых в справочной литературе на русском языке.

Интеграция достижений в области микроэлектроники и механики привела к зарождению в конце 60-х годов прошлого века новой совокупности методов обработки кристаллов кремния и изготовления в непрерывном технологическом цикле неразъемных механических устройств с характерными пространственными объемами для их перемещений и вращательных движений. В Европе этот способ производства называли — микросистемная технология (*microsystems technology — MST*) [1].

Основой этого способа является традиционная микроэлектронная технология для производства интегральных схем, к которой добавлена новая операция — удаление жертвенных слоев, позволяющих создавать пространственные объемы для перемещений и вращательных движений частей устройства в самом кристалле. Особенно важными операциями в микросистемной технологии являются литография и травление, которые и определяют возможности изготовления очень сложных устройств [2].

В США на основании микросистемной технологии создали достаточно большое число устройств, которые называли микроэлектромеханическими системами (*microelectromechanical systems — MEMS*). Такая микроэлектромеханическая система (МЭМС) представляет собой микроминиатюрное электронно-механическое устройство, элементы которого неразрывно связаны конструктивно, технологически, электрически и механически, обеспечивая перемещение и вращательные движения частей устройства в самом кристалле.

Дальнейшая интеграция информатики и измерительной техники с микроэлектроникой и механикой вскоре обеспечила создание микрооптоэлектромеханических систем (*microoptoelectrome-*

chanical systems — MOEMS), в которых микроминиатюрное электронно-механическое устройство воздействовало на оптическое излучение: отклоняло, перекрывало и модулировало падающий световой поток. Эта микрооптоэлектромеханическая система (МОЭМС) представляет собой микроминиатюрное оптоэлектронно-механическое устройство, элементы которого неразрывно связаны конструктивно, технологически, электрически, механически и оптически, обеспечивая перемещение и вращательные движения частей устройства в самом кристалле и изменяя оптический сигнал, поступающий в систему и выходящий из нее.

Подключение химиков и биологов к процессу использования микроэлектромеханических систем позволило разработать новый тип устройств — биомикроэлектромеханические системы (БиоМЭМС). Этот тип представляет собой микроминиатюрное биоэлектронно-механическое устройство, элементы которого неразрывно связаны конструктивно, технологически, электрически и механически, обеспечивая перемещение химических веществ и биологических материалов в самом кристалле и изменение их свойств в системе или после выхода из нее.

Практически все системы, изготовленные по микросистемной технологии, связаны с механическими устройствами в кристалле, что позволяет объединить их в собирательный образ с использованием механики (свойственный для русского языка) — микросистемную технику. В понятие включаются все перечисленные выше устройства: микроэлектромеханические, микрооптоэлектромеханические и биомикроэлектромеханические системы.

В России термин "микросистемная техника" (МСТ) стал использоваться в официальных документах после принятия в 1996 г. Перечня критических технологий Федерального уровня. В приоритетные направления развития науки и техники Российской Федерации на 2001...2010 годы (раздел производственных технологий) в состав критических технологий Федерального уровня включена и микросистемная техника.

Следует отметить, что в Японии используется термин — микромашины, который является собирательным для устройств, изготовленных по микросистемной технологии.

Таким образом, целесообразно предложить такие термин и определение:

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА — область микроэлектроники, связанная с созданием и применением микроминиатюрных устройств, изготов-

ленных в непрерывном технологическом цикле неразъемных электронно-механических компонентов и узлов с характерными пространственными объемами в самом кристалле, в том числе и для перемещений и вращательных движений отдельных частей системы.

Такой подход позволяет провести классифика-

цию микросистемной техники в зависимости от размеров (см. таблицу), прежде всего с учетом сложности и массогабаритных характеристик кристаллов [3], и предложить следующие градации:

- компоненты микросистемной техники;
- узел микросистемной техники;
- изделие (модуль) микросистемной техники;

Классификация микросистемной техники с учетом сложности и массогабаритных характеристик

Название	Характеристика	Масса, г	Размеры, мм	Примеры реализации
Компоненты микросистемной техники	Изделия, изготовленные на одном кристалле методами микроэлектронной технологии и содержащие от 1 до 1000 механических элементов	3...30	0,3...3	Микромеханика. Микроэлектромеханические системы. Микроакселерометры. Акселерометр на кристалле: в авиации США для инерциального измерительного блока (SiIMU01), инерциального измерительного блока (DQI), инерциальной навигационной системы (DQI-NP). Микрогироскопы. Трехосевые микроакселерометры для противотанкового боеприпаса калибра 120 мм (тип M830A1HEAT, США). Микроредуктор. Микродвигатели (электростатический, электромагнитный, реактивный на газообразном и на твердом топливах). Микровентили. Тип 4425-15 с площадью 4 мм ² для микрореактивных двигателей (фирма EG&G Sensors Corp., США). Датчики давления. Химические сенсоры (чувствительные элементы). Магниторезистивные чувствительные элементы. Катушки индуктивности на кристалле. Микрореле. Впрыскивающие сопла. Микрооптоэлектромеханические системы. Оптический переключатель-мультиплексор с набором из 250 микрозеркал (по технологии Summeit-Vsurface MEMS, США). Биомикроэлектромеханические системы. Прототип "лаборатории на кристалле" (ЛНК), на 34 микрорезервуара по 24 нанолитра каждый (Массачусетский технологический институт, США).
Узел микросистемной техники	Изделие, состоящее на 100 % из компонентов микросистемной техники	3...30	3...30	Микродвигатель (электростатический, электромагнитный, реактивный на газообразном и на твердом топливах). Образец двигателя малой тяги 1 мН с двухсторонними соплами для микроспутника (Aerospace Corporation, США). "Умная пыль" на кристалле для создания распределенных систем. Головки для накопителей на жестких дисках. Головки для струйных принтеров. Кардио-пейсмейкеры. Слуховые аппараты. Формирователи ИК видеосигналов. Микроспектрометры. Микроэлектромеханический спектрограф с объемом 6 см ³ (Окридская лаборатория, США). Системы подачи лекарственных сред. Магнитооптические головки. Проекционные световые затворы. Инклинометры (угломеры).
Изделие (модуль) микросистемной техники	Изделие, состоящее на 70 % и более из компонентов микросистемной техники	30...300	10...300	Миниатюрный летательный аппарат (Micro Air Vehicle — MAV, получивший название Black Widow, США) с массой 80 г и размахом крыльев 15 см. Микровертолет. Микроробот (для движения по трубам). Микроракета. Недорогостоящая высокоточная управляемая ракета (Low Cost Precision Kill — LCPK, проект WE.28.02A, США) длиной 7 см. Электронные носы. Сенсоры для предупреждения столкновения. Робот "Минога" (грант DARPA № 00014-98-1-0381, США).
Комплексированное изделие (микросборка) микросистемной техники	Изделие, состоящее на 50 % и более из компонентов микросистемной техники	300...3000	30...300	Космические микроаппараты. Микроспутник, состоящий из компонентов и узлов микросистемной техники и микроэлектроники, массой 2...3 кг. Миниатюрный беспилотный летательный аппарат (проект AP.20.00, США) с неподвижным крылом и размахом до 15 см. Малоразмерный двигатель с тягой 1...10 кг для демонстрации возможности технологий и летных испытаний малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (Small Scale Propulsion System, США). Робот "Щука" ("Pike", Нью-Гемпширский университет, США).

комплексированное изделие (микросборка) микросистемной техники.

Предложенный термин позволяет связать микросистемную технику с последующим совершенствованием технологии и переходу к наносистемной технике, для которой уже обсуждена следующая формулировка [4]:

НАНОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА — созданные полностью или частично на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям.

Данный термин приведен в "Концепции развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 года", одобренной в основном Правительством Российской Федерации (18 ноября 2004 г.).

Значительную роль в развитие микросистемной техники внесло Министерство образования Российской Федерации, открывшее в 2000 году подготовку инженеров по новой специальности — 201900 "Микросистемная техника" в рамках Направления подготовки дипломированного специалиста: 654100 — Электроника и микроэлектроника, а с 2003 г. — 658300 — Нанотехнология для электроники и материалов. В настоящее время несколько институтов России начали подготовку инженеров по этим специальностям.

Однако при подготовке инженеров остались нерешенными ряд вопросов по терминологии. Например, в соответствии с нормативной базой, утвержденной в России, должны употребляться термины: "кристалл", а не "чип"; "чувствительный элемент электронного датчика", а не "сенсор" и т. д. Эти замены терминов происходят не только в статьях, но и в учебных пособиях для студентов.

При разработке чувствительных элементов электронных датчиков с использованием микроэлектромеханических систем [5] целесообразно использовать термины и определения, изложенные в действующих стандартах [6, 7].

В настоящее время возникает неоднозначное толкование между физиками, электронщиками, программистами, химиками и биологами при использовании ряда терминов [8, 9]. Например, наносистема — это вещество с наносостояниями или наносистемная техника с механическими элементами; микроэлементы — это вещество или элементы микросхем (интегральных схем); микросистемы — это микроэлектронные системы, системы на кристалле или микросистемная техника с механическими элементами. Еще больше вопросов возникает при обсуждении терминов: нанонаука, нанотехнология.

Хотелось бы обсудить предлагаемые термины для использования их в нормативной базе, а при необходимости и подкорректировать ее.

Список литературы

1. Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—6.
2. Вернер В. Д., Мальцев П. П., Сауров А. Н., Чаплыгин Ю. А. Синергетика миниатюризации: микроэлектроника, микросистемная техника, наноэлектроника // Микросистемная техника. 2004. № 7. С. 23—29.
3. Мальцев П. П. О классификации в области микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 1. С. 9—10.
4. Алфимов С. М., Быков В. А., Гребенников Е. П. и др. Развитие в России работ в области нанотехнологий // Микросистемная техника. 2004. № 8. С. 2—8.
5. Мальцев П. П., Кузин А. Ю., Телец В. А. О терминах в микросистемной технике // Микросистемная техника. 2002. № 10. С. 35—37.
6. ГОСТ 16263—70. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения.
7. ГОСТ Р 51086—97. Датчики и преобразователи физических величин. Электронные. Термины и определения.
8. Алферов Ж. И., Асеев А. Л., Гапонов С. В., Коптев П. С., Панов В. И., Полторацкий Э. А., Сибельдин Н. Н., Сулис Р. А. Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3—13.
9. Шевченко В. Я. О терминологии: наночастицы, наносистемы, наноконструкты, нанотехнологии // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 2—4.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОБЩЕПРИНЯТЫХ ТЕРМИНАХ В РОССИИ

1. Ожегов С. И. **Словарь русского языка: 70 000 слов** / Под ред. Н. Ю. Шведовой. — 22-е изд., стер. — М.: Рус. яз., 1990. — 921 с.

ИНДУСТРИЯ. То же, что и промышленность. *Тяжелая и Легкая и. // прил. индустриальный.*

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ. Отрасль производства, охватывающая переработку сырья, разработку недр, создание средств производства и предметов потребления. *Добывающая п. Обрабатывающая п. Тяжелая п. Легкая п. Машиностроительная п. Пищевая п. // прил. промышленный. Промышленные районы. П. потенциал страны. Промышленное объединение (комплекс производственных, технологических научно-исследовательских, конструкторских предприятий и организаций).*

ТЕХНИКА. 1. Круг наук, связанных с изучением и созданием средств производства, орудий труда. *Наука и т.* 2. Совокупность средств труда, знаний и деятельности, служащих для создания материальных ценностей. *Передовая т. Овладеть техникой.* 3. Совокупность приемов, применяемых в каком-н. деле, мастерстве. *Музыкальная т. Т. шахматной игры.* 4. *собр.* Машины, механические орудия, устройства. Ремонт техники.

ТЕХНОЛОГИЯ. Совокупность производственных методов и процессов в определенной отрасли производства, а также научное описание способов производства. *Т. производства. Т. волокнистых веществ. Нарушение технологии. // прил. технологический. Т. процесс. Технологические требования.*

2. **Большой энциклопедический словарь.** — М.: ООО "Издательство АСТ"; ООО "Издательство Астрель". 2003. — 1247 с. — (Современная энциклопедия).

ИНДУСТРИЯ, то же, что и *промышленность*.

ИНТЕГРАЛЬНАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА, см. *Микроэлектроника*.

ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА (ИС, интегральная микросхема), микроминиатюрное электронное устройство, элементы которого неразрывно связаны конструктивно, технологически и электрически. Делятся на малые, средние, большие и сверхбольшие.

МЕХАНО... часть сложных слов, означающих механическое движение или механизм (напр., механохимия).

МИКРО... (от греческого *mikros* — малый), 1) часть сложных слов, означающих очень малую величину чего-либо, например, микроорганизм. 2) Приставка (мк) для образования дольных единиц, равных одной миллионной доле от исходной.

МИКРОМЕТР, дольная единица длины СИ, равная 10^{-6} м; обозначение: мкм.

МИКРОМОДУЛЬ, в радиотехнике — миниатюрный модуль, функционально законченный узел радиоэлектронной аппаратуры с уплотненной упаковкой микроэлементов.

МИКРОСБОРКА — блок радиоэлектронной аппаратуры в микроминиатюрном исполнении, собранный из дискретных электронных приборов, электро- и радиокомпонентов и бескорпусных интегральных схем.

МИКРОСХЕМА (интегральная схема) — микроминиатюрное электронное устройство, элементы которого неразрывно связаны конструктивно, технологически и электрически.

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА — область электроники, связанная с созданием и применением в радиоэлектронной аппаратуре узлов и блоков, выполненных на интегральных схемах и микроминиатюрных конструктивно-вспомогательных изделиях.

МИКРОЭЛЕМЕНТ, в биологии — химические элементы, в малых количествах необходимые для нормальной жизнедеятельности организма.

НАНО... (от греческого *nanos* — карлик) — приставка для образования наименования дольных единиц, равных одной миллиардной доле исходных единиц (10^{-9}). Обозначения: н, п.

НАНОТЕХНОЛОГИЯ — технология объектов, размеры которых порядка 10^{-9} м (атомы, молекулы). Включает атомную сборку молекул, новые методы записи и считывания информации и др.

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ — отрасль народного хозяйства. Стоит из добывающей и обрабатывающей.

СИСТЕМА — совокупность разным образом связанных между собой элементов, образующих определенную целостность.

СИСТЕМОТЕХНИКА — научное направление, охватывающее проектирование, создание, испытание и эксплуатацию сложных систем.

СХЕМОТЕХНИКА — научно-техническое направление, охватывающее проблемы анализа и синтеза электронных устройств радиотехники, связи, автоматики, вычислительной техники и др.

ТЕХНИКА — совокупность средств человеческой деятельности, создаваемых для осуществления процессов производства и обслуживания непрямых потребностей общества.

ТЕХНОЛОГИЯ — совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции.

3. **"Концепция развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 года"**, одобренная в ос-

новном Правительством Российской Федерации (18 ноября 2004 г.), использует следующие термины:

НАНОТЕХНОЛОГИЯ — совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, хотя бы в одном измерении, и в результате этого получившие принципиально новые качества, позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба; в более широком смысле — этот термин охватывает также методы диагностики, карактерологии и исследований таких объектов;

НАНОМАТЕРИАЛ — материал, содержащий структурные элементы, геометрические размеры которых, хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и, благодаря этому, обладающий качественно новыми свойствами, в том числе заданными функциональными и эксплуатационными характеристиками;

НАНОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА — созданные полностью или частично на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям;

НАНОИНДУСТРИЯ — вид деятельности по созданию продукции на основе нанотехнологий, наноматериалов и наносистемной техники.

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ТЕРМИНЫ В ОБЛАСТИ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ РОССИИ

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ — совокупности методов обработки кристаллов кремния и изготовления в непрерывном технологическом цикле неразъемных механических устройств с характерными пространственными объемами, в том числе для перемещений и вращательных движений в самом кристалле.

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА — микроминиатюрное электронно-механическое устройство, элементы которого неразрывно связаны конструктивно, технологически, электрически и механически, обеспечивая перемещение и вращательные движения частей устройства в самом кристалле.

МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА — микроминиатюрное оптоэлектронно-механическое устройство, элементы которого неразрывно связаны конструктивно, технологически, электрически, механически и оптически, обеспечивая перемещение и вращательные движения частей устройства в самом кристалле и изменяя оптический сигнал, поступающий в систему и выходящий из нее.

БИОМИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА — микроминиатюрное биоэлектронно-механическое устройство, элементы которого неразрывно связаны конструктивно, технологически, электрически и механически, обеспечивая перемещение химических веществ и биологических материалов в самом кристалле и изменение их свойств в системе или после выхода из нее.

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА — область микроэлектроники, связанная с созданием и применением микроминиатюрных устройств, изготовленных в непрерывном технологическом цикле неразъемных электронно-механических компонентов и узлов с характерными пространственными объемами в самом кристалле, в том числе и для перемещений и вращательных движений отдельных частей системы.

УДК 621.3.049

В. Д. Вернер, д-р физ.-мат. наук, проф.,
НПК "Технологический центр" МИЭТ,
V.Verner@tcen.ru

К ТЕРМИНОЛОГИИ В МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

Рассматривается терминология в области микро-системной техники с учетом сложившихся понятий и необходимости ее дефиниции как техники, связанной с миниатюризацией размеров элементов до микрометрового размера.

Популярность термина почти всегда приводит к расширению понимания его содержания. Это, в частности, коснулось и микросистемной техники (МСТ). В результате, оценки мирового рынка МСТ разных аналитических фирм различаются на порядок. К счастью, темпы роста производства и рынка МСТ практически всеми оцениваются на уровне 20 % в год, что свидетельствует о чрезвычайно высоком инновационном потенциале МСТ. Вместе с тем, для любой области техники желательна четкая определенность ее границ. Определение этих границ по какому-то одному признаку часто начинает играть роль "прокрустового ложа", так как технические изделия имеют значительное число различных параметров, определяющих их назначение, конструкцию, эксплуатацию и т. д. [1].

Свое обсуждение начнем с толкования термина "микроэлектроника" в энциклопедическом словаре "Электроника":

"Микроэлектроника — направление электроники, связанное с созданием приборов и устройств в микроминиатюрном исполнении и использованием групповой технологии их изготовления. *Миниатюризация* в изделиях микроэлектроники неразрывно сочетается с интеграцией *элементарных* приборов и качественных *функций*. Процесс развития обеих тенденций продолжается по настоящее время, что не позволяет при дефиниции микроэлектроники или при классификации соответствующих приборов и устройств употреблять постоянные меры или ограничительные диапазоны величин..." [2].

Переноса эти положения на МСТ, отметим основные понятия, которые должны быть использованы при дефиниции МСТ:

Миниатюризация на уровне нескольких единиц или долей микрометра.

Таким образом, основным становится понимание приставки "микро..." как дольной единицы, равной одной миллионной от исходной (мк), а не очень малой величины чего-либо, например, мик-

роорганизм или микроробот, как очень маленькие организмы или роботы. (см. [3]). При этом такой уровень миниатюризации должен быть достигнут использованием *групповой технологии* изготовления. Подкованная Левшой блоха или действующая микромодель автомата Калашникова не являются МСТ.

Система — совокупность связанных между собой *элементов*, образующих определенную целостность [3]. Будем считать, что система образуется путем *интеграции* элементов. Система — не просто сумма элементов, благодаря их интеграции система обретает новое качество или новые функции.

Функция — основное назначение элемента, изделия и т. д.

Важность изменения функции при миниатюризации была подчеркнута Патентной службой США [4]. В соответствии с их требованием изделием нанотехнологии называется такое изделие, в котором, по крайней мере, один из его размеров должен быть в диапазоне от 1 до 100 нм и этот размер должен быть существенным для функции квалифицируемого изделия. Таким образом, новейшая КМОП-интегральная микросхема с размерами затвора 10...30 нм остается изделием микроэлектроники, а не нанотехнологии. Атомный силовой микроскоп — объект нанотехнологии из-за острого кантилевера, хотя сам он имеет достаточно большие размеры. Влияние уменьшения размера при миниатюризации на функциональность можно проследить и на примере изделий МСТ. Медицинский микроробот и микрокатетер могут проникать в более узкие полости, в микроканалах и микрореакторах перемешивание и реакции проходят за меньшее время. Казалось бы, биочип не вносит ничего нового в анализ. Просто пробирка заменяется "сайтом". Но вследствие малых размеров сайта можно расположить их на пластине в большом количестве и значительно ускорить или расширить анализ.

Попытаемся свести все сказанное выше в определение микросистемы (МС).

Микросистема — изделие, представляющее собой совокупность связанных элементов, миниатюризация, по крайней мере, одного из которых до диапазона микрометровых размеров приводит к появлению новых функций или улучшению характеристик изделия. Элементы микросистемы интегрируются в определенное целое методами одного из видов *групповой микрообработки*.

По структурному признаку МС можно разделить на полные и неполные.

Полные МС содержат следующие элементы:

- воспринимающие воздействие со стороны окружающей среды (чувствительные элементы, приемники излучения и т. д.);

- преобразующие элементы, которые преобразуют воздействие окружающей среды в информационный сигнал или меняют его (чувствительные элементы датчиков, электронные и оптические элементы схем обработки сигнала);
- элементы, превращающие внутренний информационный сигнал в воздействие на окружающую среду (актюаторы) или в сигнал, поступающий во внешний информационный канал.

Неполные МС могут содержать только один или два типа из перечисленных выше элементов. К числу таких МС можно отнести микроканальные МС и биочипы. Сайт классического биочипа взаимодействует с аналитом и локализует определенные фрагменты из него. Этот факт устанавливается внешним наблюдением. Однако существуют конструкции биочипа, в которых сайт является чувствительным элементом и преобразует изменение состояния сайта в информационный сигнал. В данном случае биочип — это матричный преобразователь или датчик, и он должен быть отнесен к разряду полных МС.

К числу полных МС следует отнести и микро-электромеханические системы (МЭМС), а также и их градации по применению: оптические МЭМС (МОЭМС), радиочастотные МЭМС (РЧ МЭМС), микрофлюидные МЭМС (МФ МЭМС) и т. д.

В зависимости от вида использования МС могут быть:

- автономными;
- встраиваемыми;
- сетевыми (групповыми), например, в мульти-агентной сети.

В зависимости от конструкции МСТ могут быть выделены:

- компоненты МСТ;
- узел МСТ;
- изделие (включая модули) МС;
- комплексированные изделия (включая микросборки) МСТ [5].

Отметим, что оба введенных понятия "элемент", и "компонент" являются нижним звеном иерархической цепочки. Но первый относится к функциональной структуре МС, а второй — к ее конструкции. Элемент может содержать несколько компонентов, и наоборот. В понятие "комплексированное изделие МСТ" входит не объединение МС с макросистемой (это "встроенная" МС), а объединение нескольких видов МС для получения новых функций. Примером может служить микроробот, имеющий помимо рабочих (транспортных) "конечностей" также "органы чувств" и "мозги".

Учитывая многообразие применений МСТ в различных областях техники — электронике, измерительной, транспортной, медицинской технике и т. д., следует стандартизировать только базовые

понятия. Для определенности необходимо взять за основу стандарты отраслей, приемы технологий и типы конструкций, которые наиболее часто используются в МСТ. Например, наибольшее распространение при изготовлении МС получила технология микрообработки кремния, которая основана на использовании и адаптации технологий микроэлектроники [6]. Наиболее часто в конструкциях МС используются элементы датчиков, поэтому в качестве основы следует рассмотреть стандарты этих областей техники. Например, структурная схема интегрального микроэлектронного датчика полностью соответствует принципиальной структуре МЭМС [7]. Следовательно, для МЭМС действительно можно использовать перечень терминов и определений на основе стандартов "ГОСТ 51086—97. Датчики и преобразователи физических величин. Электронные. Термины и определения" и "ГОСТ 16263—70. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения" [8].

Вводить классификацию МСТ с учетом сложности и массогабаритных характеристик нецелесообразно, так как при этом выбор границ численных значений размеров, массы, доли компонентов МСТ в изделии трудно обосновать. Более обоснованным кажется структурно-функциональный подход к классификации МС, использованный в работе [9] для классификации мини- и микроробототехнических систем.

Хотелось бы обсудить предлагаемые термины для использования их в нормативной базе, а при необходимости скорректировать ее.

Список литературы

1. Вернер В. Д., Пурцхванидзе А. И. Микросистемы: проблемы и решения // Микросистемная техника. 2002. № 10. С. 13—18.
2. **Электроника.** Энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1991. С. 305.
3. **Большой** энциклопедический словарь. М.: ООО "Издательство АСТ"; ООО "Издательство Астрель", 2003.
4. **Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology.** American Scientific Publishers, 2004.
5. **Мальцев П. П.** О классификации в области микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 1. С. 9—10.
6. **Madou M. Y.** Fundamental Microfabrication. CRC Press, 2002.
7. **Шелепин Н. А.** Кремниевые преобразователи физических величин и компоненты датчиков. Датчики и микросистемы на их основе // Микросистемная техника. 2002. № 9. С. 2—10.
8. **Мальцев П. П., Кузин А. Ю., Телец В. А.** О терминах в микросистемной технике // Микросистемная техника. 2002. № 10. С. 35—37.
9. **Бурдаков С. Ф., Кириченко В. В., Коротынский А. В., Смольников Б. А., Чистяков В. М.** Классификация зарубежных мини- и микроробототехнических систем военного назначения на основе структурно-функционального подхода // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 4. С. 37—42.

УДК 001:003.13

А. Е. Варшавский, д-р экон. наук, проф.,
ЦЭМИ РАН

ПОКАЗАТЕЛИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ НАУКИ РОССИИ*

Приведены результаты расчета показателей результативности науки России и ряда стран ОЭСР.

Для количественной оценки результативности (или эффективности) науки в нашей стране, как правило, используют межстрановые сопоставле-

* Статья подготовлена на основании стенограммы совещания Межфракционного депутатского объединения "Наука и высокие технологии" совместно с Комитетом по образованию и науке, Комитетом по промышленности, строительству и наукоемким технологиям и Комитетом по энергетике, транспорту и связи на тему: "Нанотехнологии — проблемы развития и подготовки кадров" в Государственной Думе 26 октября 2004 г. под председательством лауреата Нобелевской премии академика Ж. И. Алферова. Стенограмма подготовлена и представлена В. И. Бабкиным.

ния на основе объемных показателей (таких, как число патентных заявок или полученных патентов, объем экспорта высокотехнологичной продукции либо поступления от экспорта технологий), а также показателей удельного веса страны в мировой торговле высокими технологиями и т. д.

По этим показателям Россия занимает далеко не первое место и поэтому их используют чаще всего для обоснования мероприятий определенной направленности, как правило, не способствующих сохранению и развитию сферы НИОКР (например, для обоснования необходимости приватизации объектов науки, ее разгосударствления, сокращения числа научных организаций — мероприятий, ведущих к переделу собственности и т. п.).

Однако в наиболее развитых странах для количественной оценки результативности науки и степени перехода страны к обществу, основанному на знаниях, используют другие показатели: характеризующие вход инновационной системы (уровень затрат на НИОКР относительно ВВП, численности населения или персонала, занятого исследова-

Показатели результативности сферы НИОКР России и стран ОЭСР

Страна	Вход инновационной системы		Выход инновационной системы				
			Отдача от затрат на НИОКР (эффект)		Затраты НИОКР на единицу инновационной продукции		
	Затраты на НИОКР к ВВП, %, 2000 г.	Затраты на НИОКР в расчете на душу населения, долл. ППС*, 1999 г.	Валовая добавленная стоимость продукции высокотехнологичных отраслей к затратам на НИОКР, раз, 1999—2000 гг.	Чистые поступления от экспорта технологий к затратам на НИОКР (долл./долл.)	Среднегодовые затраты НИОКР на одну статью в ведущих журналах, тыс. долл. ППС, 1992—2002 гг.	Затраты НИОКР на одну патентную заявку, тыс. долл. ППС, 1993 г.	Среднегодовые затраты НИОКР на одну патентную заявку, тыс. долл. ППС 1993—1998 гг.
США	2,7	12,7	3,1	0,137	894	973	1008
Япония	3,0	10,7	3,6	...	1366	223	225
Германия	2,5	8,3	4,7	0,237	769	398	376
Великобритания	1,9	6,1	4,4	...	434	242	221
Франция	2,2	6,8	3,4	...	653	351	303
Канада	1,8	6,3	...	...	394	247	246
Италия	1,0	3,4	6,9	...	492	180	156
Австралия	1,7 (1996 г.)	5,1	...	...	337	225	173
Швейцария	2,6	9,8	4,4	...	424	103	77
Нидерланды	2,0	6,9	...	...	407	129	103
Россия	1,28 (2003 г.); 1,01 (2000 г.)	1,0	3,9	0,135 (2003 г.); 0,176 (2001 г.)	341	285	384

*ППС — паритет покупательной способности

ниями и разработками, доля затрат на образование и т. д.), а также ее выход — эффект от затрат на науку и другие отрасли сектора знаний (затраты НИОКР в расчете на патент, патентную заявку, поданную отечественными заявителями, статью в ведущих журналах и т. д.).

В таблице приведены результаты расчета показателей результативности сферы НИОКР России и ряда стран ОЭСР (Организации экономического сотрудничества и развития).

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что в сравнении с наиболее развитыми странами уровень затрат на НИОКР в России наиболее низок.

Однако показатели результативности научных исследований и разработок, несмотря на низкий уровень финансирования, не уступают уровню наиболее развитых стран мира, а в ряде случаев и превосходят их:

- на 1 долл. затрат на НИОКР в России приходится больше валовой добавленной стоимости продукции высокотехнологичных отраслей, чем в США, Японии и Франции;
- чистые поступления от экспорта технологий в расчете на единицу затрат НИОКР примерно соответствуют уровню США;
- затраты НИОКР в расчете на одну статью в ведущих журналах у нас примерно в 2—4 раза ниже, чем в США, Японии, Германии, Франции, что свидетельствует о значительной недооценке высококвалифицированного труда в России (для расчетов была использована информация, полученная В. А. Маркусовой на основе базы данных ИНИ "Essential Science Indicators", в ко-

торую включено всего 66 наименований отечественных научных журналов, причем 90—95 % статей подготовлены учеными РАН; с учетом других статей показатели для России должны быть еще более снижены; для сравнения — в базе представлены 1484 наименования журналов США);

- в расчете на одну патентную заявку затраты НИОКР в России примерно соответствуют уровню Германии и Франции и значительно уступают уровню затрат в США, т. е. результативность отечественной науки по этому показателю высока (в 1993 г. они были ниже, чем в США, Германии, Франции, а в 1998 г. значительно возросли по сравнению с другими странами вследствие того, что кризисные явления в экономике затормозили инновационную активность: число заявок в 1998 г. снизилось примерно на четверть по сравнению с 1993 г., в то время как за рубежом число патентных заявок повысилось в среднем в 1,5 и более раз, т. е. снижение данного показателя не было вызвано снижением эффективности работы ученых, а определялось процессами в экономике).

Таким образом, можно сделать главный вывод о том, что **результативность сферы НИОКР в России соответствует уровню наиболее развитых стран и в ряде случаев превосходит его.** Это означает также, что для того, чтобы сравняться с передовыми странами по объемам производства и экспорта высокотехнологичной продукции, необходимо в первую очередь существенно повысить затраты на НИОКР и образование.



Московский институт радиотехники, электроники
и автоматики (технический университет)
Третья Новгородская международная
научно-техническая конференция

**"ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЭМС И ПРИБОРОВ
НА ОСНОВЕ СЛОЖНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ"**

При участии: EV Group (Австрия)
DISCO HI-TEC EUROPE GMBH (Германия)

18—19 октября 2005 года

Великий Новгород
Информация об участии:
тел./факс: +7 095 7334777
тел. +7 095 7233651
эл. почта: ikarimp@gmail.com

УДК 538.958; 538.4

**В. В. Стрельчук, М. Я. Валах, Е. Г. Гуле,
А. Ф. Коломыс, М. П. Лисица,**
Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарева НАН Украины,
e-mail: strelch@isp.kiev.ua,
Yu. I. Masur, Z. M. Wang, and G. J. Salamo
University of Arkansas, Department of Physics,
Fayetteville, Arkansas, 72701

МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР (In, Ga)As/GaAs С КВАНТОВЫМИ НИТЯМИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ОТЖИГЕ

Проведены оптические исследования 17-периодных $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ структур с квантовыми нитями (КН), подвергнутых быстрому термическому отжигу (БТО) (550–850 °C, 30 с). Показано, что БТО приводит к высокоэнергетическому сдвигу максимума полос ФЛ (In, Ga)As КН и 2D (In, Ga)As слоя, что обусловлено изменением компонентного состава и деформаций в результате процессов интердиффузии атомов In/Ga. Изменение энергии активации температурного гашения полосы ФЛ (In, Ga)As КН отожженных образцов в зависимости от температуры отжига объяснены изменением квантово-размерного потенциала в результате интердиффузии. Высокоэнергетический сдвиг максимума ФЛ (In, Ga)As КН с увеличением интенсивности возбуждения свидетельствует о наличии пьезоэлектрического поля в КН. Обнаружена сильная оптическая анизотропия спектров ФЛ, которая является результатом анизотропии формы КН и анизотропии релаксации деформаций. Показано, что БТО многослойных (In, Ga)As КН может использоваться для улучшения однородности размеров КН, увеличения степени линейной поляризации и изменения энергии излучения.

Введение

Процесс самоорганизованного роста по механизму Странского—Крастанова когерентных бездислокационных (In, Ga)As/GaAs наноструктур активно развивается в настоящее время для получения наноразмерных квантовых точек (КТ) и квантовых нитей (КН). Эти структуры демонстрируют уникальные физические свойства и представляют значительный интерес как для фундаментальных физических исследований, так и для улучшения характеристик современных оптоэлектронных приборов, например, уменьшения пороговой плотности тока накачки в полупроводниковых ла-

зерах [1]. Более изученными являются физические свойства структур с КТ. Методы получения высококачественных КН на сегодня менее отработаны и развиваются в нескольких вариантах. Квантовые нити получены на отклоненных (110) подложках с использованием толщинных модуляций или пучков атомных ступенек [2]. Есть вариант роста на подкладках с искусственно созданными V-подобными канавками с использованием модуляции компонентного состава [3]. Возможен рост КН на высокоиндексных поверхностях с использованием регулярно сформированных фасеток [4]. Недавно (In, Ga)As КН были получены в режиме самоорганизации на подложках GaAs(100) [5, 6].

В данной статье проведено исследование многослойных (In, Ga)As/GaAs(100) структур с КН, выращенных в режиме самоорганизации и подвергнутых быстрому термическому отжигу (БТО). Ожидалось, что при БТО может происходить модификация формы и изменение компонентного состава КН, которые являются критическими параметрами для их потенциального использования. Актуальность исследования изменения характеристик (In, Ga)As КН при термическом отжиге предопределена рядом причин. Во-первых, выращивание массивов КН часто осуществляется при достаточно низких температурах подложки (~540 °C), однако для того чтобы вырастить высококачественный защитный и барьерные слои, температуру подложки, как правило, повышают. Во-вторых, полупроводниковые приборы на основе КН иногда работают при относительно высоких температурах, что может приводить к изменению параметров активных областей наноструктур. В-третьих, процесс термического отжига может использоваться для целенаправленного изменения параметров наноструктур, в частности, контролируемого улучшения однородности распределения размеров КТ и КН и, соответственно, изменения электронного спектра. Например, в работе [7] рассмотрена улучшенная однородность размеров КТ при термическом отжиге однослойных (In, Ga)As/GaAs КТ и показана возможность плавного изменения энергии излучения. Обнаружено, что в процессе термического отжига InAs КТ важную роль играет процесс деформационно-усиленной интердиффузии атомов In/Ga [8]. Однако, к настоящему времени механизм интердиффузии In/Ga в структурах с (In, Ga)As КТ, а тем более в структурах с (In, Ga)As КН, полностью не установлен. До конца не выяснен и механизм модификации 2D слоев (интерфейсов) в наноструктурах при термическом отжиге и соответствующее изменение их электронных свойств.

При БТО структур с КН ожидается нарушение закона Фика [9], что обусловлено значительным усилением интердиффузионных процессов в результате наличия неоднородности распределения деформаций на гетероинтерфейсах, что подтверждают исследования КТ, подвергнутых термической обработке [7, 10, 11], InGaAs/GaAs квантовых ям [12], Si/Ge сверхрешеток [13, 14]. Что касается структуры границ КН, то также не вызывает сомнения, что они содержат повышенную концентрацию вакансий и нарушений периодичности размещения атомов. Это должно уменьшить энергию активации диффузии и увеличить вероятность процессов интердиффузии (взаимозамещения) атомов In/Ga в результате наличия градиентов как деформаций, так и компонентного состава и концентрации точечных дефектов (особенно на гетерограницах низкоразмерных структур). При этом следует ожидать, что атомы Ga будут замещать атомы In в области сильных деформаций вокруг основы КТ. Во всех случаях через гетероинтерфейсы между слоями структуры может эффективно реализоваться процесс диффузии атомов In из КН в барьерные слои, в то время как диффузия атомов Ga будет происходить в противоположном направлении. Процессы такого типа раньше наблюдали при термической обработке непокрытых InP/GaAs структур [15]. При высоких температурах отжига интердиффузия атомов может вызывать относительно быстрое полное растворение КТ и КН.

В данной статье приведены результаты оптических исследований многослойных (In, Ga)As/GaAs структур с КН, подвергнутых быстрому термическому отжигу. Показано, что лишь при $T_{\text{отж}} > 750^\circ\text{C}$ наблюдается высокоэнергетический сдвиг максимума полос ФЛ (In, Ga)As КН и 2D (In, Ga)As слоя в результате процессов интердиффузии атомов In/Ga. Из температурных исследований спектров ФЛ (In, Ga)As КН отожженных образцов определены энергии активации гашения люминесценции, которые указывают на изменение глубины и формы квантово-размерного потенциала в результате интердиффузии. Обнаружено, что процесс термического гашения с увеличением высоты барьера стартует при более высоких температурах.

Показано, что высокоэнергетический сдвиг максимума ФЛ (In, Ga)As КН с увеличением интенсивности возбуждения вызван наличием пьезоэлектрического поля в структурах с КН. Обнаружена сильная оптическая анизотропия в спектрах ФЛ многослойных (In, Ga)As/GaAs структурах с КН, которая является результатом анизотропии формы КН и анизотропии релаксации деформаций. Продемонстрирована возможность использования БТО для улучшения однородности размеров КН и увеличения степени линейной поляризации излучения.

Методика эксперимента

Исследовались многослойные $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ (100) структуры с номинальной концентрацией индия $x = 0,45$. После удаления поверхностного окисленного слоя путем термического отжига подложки при 650°C (10 мин) выращивался GaAs буферный слой толщиной 500 нм при $T = 600^\circ\text{C}$ (скорость роста — 1 монослой (МС) за секунду, давление паров As — $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па). После этого температура подложки понижалась до 540°C и осаждалось 17 периодов $(11,5\text{МС})\text{In}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/(67\text{МС})\text{GaAs}(100)$. Скорость роста слоев GaAs и $\text{In}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}$ составляла 0,4 и 0,8 МС/с соответственно. Осаждение GaAs разделяющего слоя осуществлялось с использованием процесса прерывания роста (10 с) [16].

Быстрый термический отжиг проводился в атмосфере аргона при температурах $550\text{—}850^\circ\text{C}$ в течение 30 с. Время выхода на рабочую температуру составляло 10 с.

Морфология поверхности образцов исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в контактной моде.

Спектры ФЛ регистрировались в температурном диапазоне $8\text{—}300\text{ К}$ с помощью спектрометров МДР-23 и TRIAX-550 с охлаждаемой CCD камерой (OMA V:512 — 1,7). Возбуждение ФЛ осуществлялось второй гармоникой Nd: YVO4 лазера с длиной волны 532 нм, излучение которого фокусировалось в точку размером 50 мкм.

Анализ поляризации излучения структуры проводился с помощью поляризатора Глана—Томпсона и пленочной широкополосной волновой $\lambda/4$ ($\lambda/2$) пластинки (Achromatic Zero-order Waveplate IORP44-4 (IORP42-4)), которые размещались перед входной щелью монохроматора. Проведенные дополнительные контрольные поляризационные измерения от одной и той же точки образца при его вращении на 90° показали, что поляризационная анизотропия не зависит от ориентации образца в кристате.

Результаты и обсуждения

На рис. 1 показано АСМ-изображение верхнего слоя 17-периодной $\text{In}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ структуры с квантовыми нитями. Морфология поверхности исходного образца являет собой массив периодических КН. Среднее расстояние между нитями составляет ≈ 90 нм, а ширина их основания изменяется в пределах $\approx 35\text{—}41$ нм. Обнаружено, что в исследуемых структурах имеет место бимодальное распределение высот КН: средние их значения равны 3,5 и 6,5 нм. (In, Ga)As КН ориентированы вдоль направления [0—11] и имеют длину более 5 мкм.

В процессе самоорганизованного формирования (In, Ga)As КН на подложке GaAs(100) существенную роль играет анизотропный характер про-

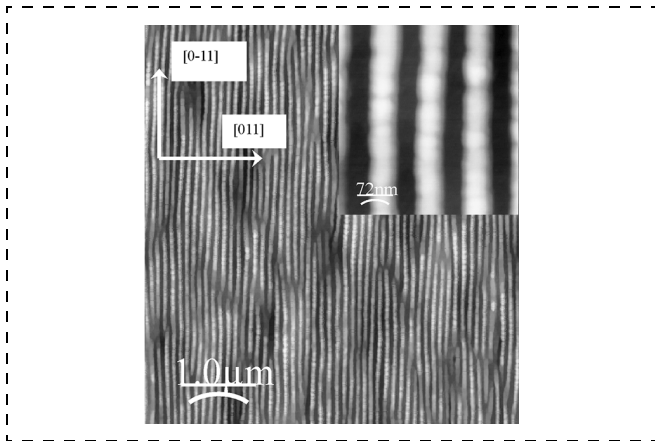


Рис. 1. АСМ-изображение верхнего слоя 17-периодной $\text{In}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ структуры с квантовыми нитями

цессов вертикальной и латеральной сегрегации атомов In, что приводит к высокой концентрации In в КН. Последнее обуславливает уменьшение ширины запрещенной зоны (In, Ga)As КН, в результате чего реализуется эффект пространственного ограничения (конфаймента) для носителей, что важно для получения люминесцентных структур с КН. (In, Ga)As КН находятся под действием напряжений сжатия, и самыми низкими оптическими переходами являются экситонные переходы с участием тяжелой дырки (e-hh экситоны). Исследуемые (In, Ga)As КН в первом приближении можно считать относительно гладкими (планарными), поскольку их размеры в направлениях [0–11] и [011] значительно больше, чем в направлении [001]. Поэтому доминирующим является эффект квантового конфаймента для [001] направления и, соответственно, электронные свойства в значительной степени будут определяться зонами тяжелых дырок, аналогично структурам с квантовыми ямами [17], где самые низкие оптические переходы включают уровни тяжелых дырок.

На рис. 2, а приведены типичные спектры ФЛ (8 К) исходного и отожженных образцов, полученные при возбуждении с энергией кванта $\approx 2,33$ эВ и низкой плотностью оптического возбуждения ($\approx 0,1$ Вт/см²). В спектре ФЛ исходного образца наблюдается узкая полоса ФЛ ($E_{\text{макс}}^{\text{ФЛ}} \approx 1,285$ эВ), которая отвечает излучательной рекомбинации экситонов (In, Ga)As КН, что указывает на высокую эффективность захвата фотовозбужденных носителей из 2D (In, Ga)As слоев и GaAs барьерных слоев структуры. Тот факт, что полуширина полосы излучения (In, Ga)As КН составляет ≈ 23 мэВ, свидетельствует о высокой однородности формы, размеров и компонентного состава. Однако, на рис. 2, а (исходный образец) видно, что форма полосы ФЛ имеет небольшую высокоэнергетическую асим-

метрию, и она может быть аппроксимирована двумя гауссовыми кривыми. Последнее может быть обусловлено бимодальным распределением высот (In, Ga)As КН, что подтверждается АСМ данными.

Проанализируем спектры ФЛ (In, Ga)As КН, подвергнутых БТО (рис. 2). Во-первых, в общем, при увеличении температуры отжига наблюдаются незначительные изменения полуширины полосы ФЛ (при этом интенсивность излучения почти не изменяется). При $T_{\text{отж}} = 850$ °С полоса аппроксимируется одной гауссовой кривой с полушириной ≈ 25 мэВ, что отвечает высокой однородности размеров и компонентного состава (In, Ga)А КН. Во-вторых, при $T_{\text{отж}} \leq 750$ °С наблюдается высокоэнергетическая асимметрия полосы ФЛ (полоса аппроксимируется двумя гауссовыми кривыми) и небольшой низкоэнергетический сдвиг ее максимума. Последнее свидетельствует о бимодальном распределении высот и низкой эффективности процессов интердиффузии In/Ga в центральной части КН. Процессы интердиффузии в КН являются достаточно сложными, что обусловлено геометрической асимметрией их формы, латеральным и вертикальным квазипериодическим распределением деформаций (такое распределение деформаций совместно с особенностями процессов кинетики и диффузии во время роста является движущей силой пространственного упорядочения КН в многослойных структурах [18]). Эффективность

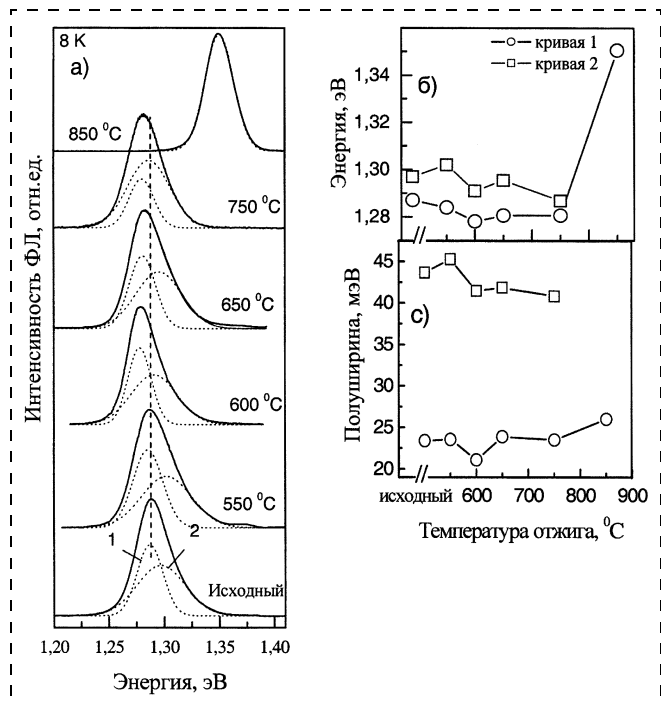


Рис. 2. Спектры ФЛ 17-периодной $\text{In}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ структуры с квантовыми нитями (а) и зависимость энергетического положения максимума и полуширины полос ФЛ от температуры БТО (б); $E_{\text{возб}} = 2,33$ эВ; $T = 8$ К; $P_{\text{возб}} = 0,1$ Вт/см²

атомного перемешивания высока в граничных областях КН, где существуют большие градиенты деформации и, соответственно, ожидается наличие больших концентраций точечных дефектов. Кроме того, в нашем случае мы ожидаем, что концентрация точечных дефектов вблизи боковых сторон КН меньше в сравнении с верхними областями КН, поскольку покрытие КН барьерным GaAs слоем при осаждении первых монослоев GaAs осуществлялось с прерыванием процесса роста. Влияние неоднородности деформации и их анизотропного характера распределения ("триаксиальные" деформации [19]) на интердиффузию является особенно актуальным при низких температурах отжига. В этом случае интердиффузия атомов In/Ga происходит преимущественно в граничных областях КН и в направлениях [011] и [001], где существуют значительные градиенты деформаций и компонентного состава. Интердиффузия в направлении [011] ([001]) приводит к релаксации деформаций и, соответственно, увеличению ширины (высоты) КН. Не исключается также возможность растворения промежуточных КН в латеральной плоскости и образование нового латерального периода КН¹.

Зависимость энергетического положения максимума и полуширины полосы ФЛ (In, Ga)As КН от температуры отжига приведены на рис. 2, б. Тот факт, что полуширина и энергетическое положение кривой 2 разложения полосы ФЛ изменяется больше в сравнении с кривой 1, может свидетельствовать о разной эффективности процессов интердиффузии для двух классов КН.

На рис. 2 видно, что при увеличении температуры БТО от 750 до 850 °С энергетическое положение максимума ФЛ изменяется в пределах $\approx 1,28$ — $1,35$ эВ ($\Delta E \approx 70$ мэВ). Этот низкоэнергетический сдвиг максимума полосы ФЛ может быть обусловлен двумя причинами:

- уменьшением концентрации индия в (In, Ga)As КН и изменением их геометрических размеров в результате процессов интердиффузии In/Ga;
- образованием структуры, подобной двумерной квантовой яме (КЯ), с неоднородным распределением компонентного состава и/или деформаций.

Таким образом, при анализе структурных изменений (In, Ga)As КН, подвергнутых БТО, необходимо дополнительно учитывать два фактора:

- анизотропию поверхностных деформаций, которая обусловлена геометрическими размерами КН и, как следствие, анизотропию диффузии атомов в плоскости слоя;

- особенности процессов диффузии атомов в напряженных гетеросистемах при низких и высоких температурах отжига.

При низких температурах будет доминировать процесс уменьшения упругих напряжений на гетероинтерфейсах за счет диффузии атомов большего радиуса в растянутую область структуры, а атомов меньшего радиуса — в сжатую. При высоких температурах актуальным становится процесс взаимозамещения атомов In/Ga, в результате чего латеральные размеры КН увеличиваются, а высота уменьшается, что может приводить к образованию сплошного 2D слоя.

Чтобы ответить на вопрос, сохранились ли КН после БТО при $T_{\text{отж}} = 850$ °С, мы провели исследование спектров ФЛ при высокой интенсивности возбуждения. Для исследуемых многослойных структур мы не ожидаем, что (In, Ga)As КН в разных слоях структуры будут электронно-связаны в вертикальном направлении, поскольку толщина GaAs барьера ≈ 20 нм [20]. Потому в спектрах ФЛ этих структур при высокой интенсивности возбуждения может проявляться эффект заполнения зон. Соответствующие спектры ФЛ (In, Ga)As КН при высокой интенсивности возбуждения (≈ 260 Вт/см²) показаны на рис. 3.

Видно, что в спектрах исходного и отожженного образцов кроме излучения, обусловленного рекомбинацией из основного состояния (In, Ga)As КН (e_1 -hh, $\approx 1,30$ ÷ $1,36$ эВ), регистрируются полосы, которые отвечают первому возбужденному состоянию (In, Ga)As КН (e_2 -hh, $E \approx 1,38$ ÷ $1,41$ эВ) и 2D (In, Ga)As слоев ($\approx 1,43$ ÷ $1,46$ эВ). Спектр ФЛ GaAs буферного слоя ($\approx 1,51$ эВ) приведен на рис. 3 для сравнения. Оказалось, что при увеличении температуры отжига энергетическое положение e_1 -hh полосы излучения КН при высоком уровне возбуждения изменяется подобно случаю низкой интенсивности возбуждения.

Интересным является тот факт, что при переходе $T_{\text{отж}}$ от 750 к 850 °С максимум полосы ФЛ 2D слоя сдвигается в высокоэнергетическую сторону на ≈ 30 мэВ (от $\approx 1,43$ эВ до $\approx 1,46$ эВ), что меньше сдвига полосы ФЛ (In, Ga)As КН (≈ 70 мэВ). Можно предположить, что этот эффект обусловлен более высокой эффективностью процессов интердиффузии в КН, чем в InGaAs слоях, вследствие чего некоторые КН могут полностью раствориться. Последнее может приводить к увеличению эффективности толщины 2D слоя и уменьшению концентрации индия в нем. Косвенным подтверждением последнего является тот факт, что полоса ФЛ (In, Ga)As КН отожженного ($T_{\text{отж}} = 850$ °С) образца хорошо аппроксимируется одной гауссовой кривой и высокоэнергетическая компонента разложения полосы ФЛ, которая присутствует в спектре исходного образца, исчезает (см. рис. 2). Сле-

¹Рентгеноструктурные исследования при асимметричном отражении 311 (скользящей геометрии регистрации) показали, что при низких температурах отжига латеральный период КН увеличивается.

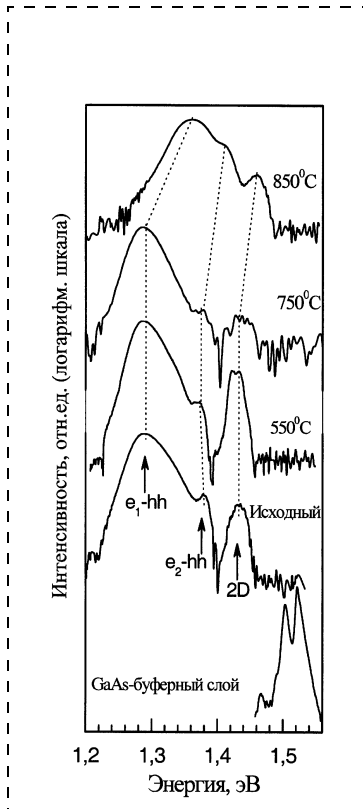


Рис. 3. Спектры ФЛ (In, Ga)As/ GaAs КН (исходного и отожженного образцов) и GaAs буферного слоя при высоком уровне возбуждения ($P_{\text{возб}} = 260 \text{ Вт/см}^2$). Спектры приведены в полулогарифмическом масштабе, $T = 8 \text{ К}$; $E_{\text{возб}} = 2,33 \text{ эВ}$; кривые смещены вниз для четкости

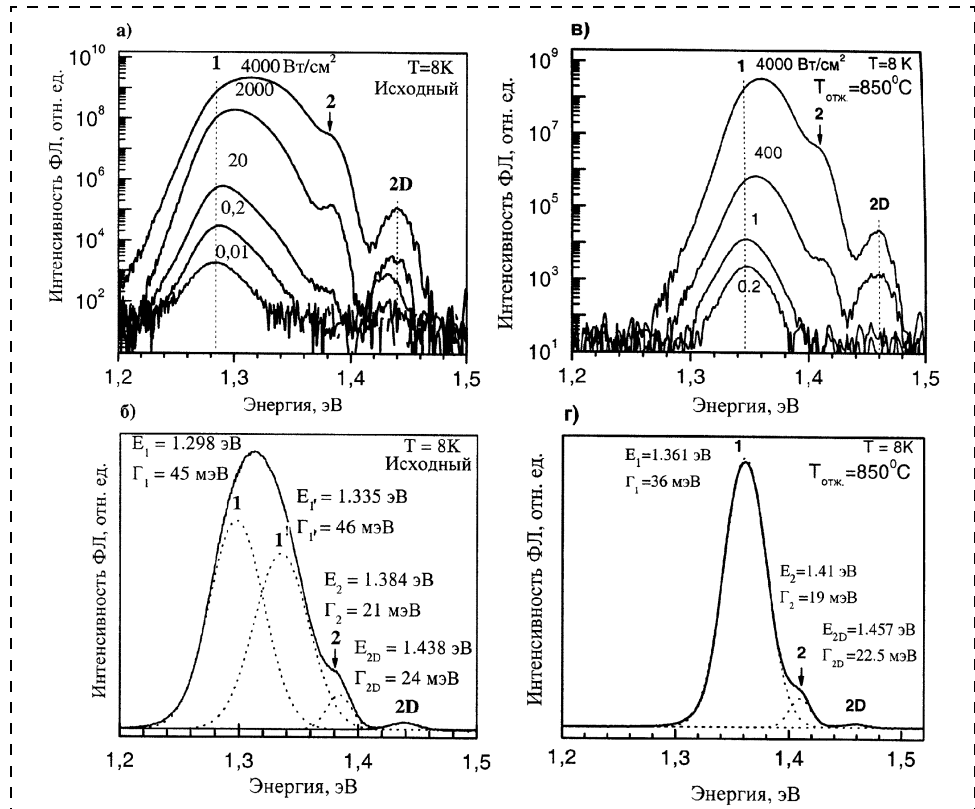


Рис. 4. Спектры ФЛ исходного (а) и отожженного образцов при 850°C (б) (In, Ga)As КН при разных интенсивностях возбуждения (Вт/см^2) в полулогарифмическом масштабе. Разложение формы линии ФЛ (в) и (г) на гауссианы ($P_{\text{возб}} = 4 \text{ кВт/см}^2$) показано в линейном масштабе вместе с полученными параметрами разложения; 1, 1' — (e_1 -hh); 2 — (e_2 -hh) — энергия оптических переходов (In, Ga)As КН и 2D-энергия излучения 2D (In, Ga)As слоя; $T = 8 \text{ К}$; $E_{\text{возб}} = 2,33 \text{ эВ}$

довательно, можно предположить, что (In, Ga)As КН меньших размеров полностью растворились в 2D слое.

На рис. 4 приведены спектры ФЛ исходного и отожженного при 850°C образцов в зависимости от интенсивности возбуждения. На рис. 4 видно, что излучательные характеристики (In, Ga)As КН [излучение с участием основного (e_1 -hh) и возбужденного (e_2 -hh) квантово-размерных уровней КН и 2D слоя] сохраняются для образца, отожженного при 850°C . Последнее является сильным аргументом, подтверждающим присутствие (In, Ga)As КН после БТО при 850°C . Последнее обусловлено тем, что КН (КТ) имеют несколько иные оптические свойства по сравнению с КЯ в результате отличий их функций плотности состояний. Например, возбужденные состояния в КТ [21] и КН [22] могут заполняться. Такой эффект не наблюдается для идеальной КЯ, поскольку в КЯ существуют непрерывные энергетические состояния между подзонами.

Интересным является и тот факт, что для образцов при высокой интенсивности возбуждения на-

блюдается высокоэнергетический сдвиг максимума этих полос ФЛ (In, Ga)As КН. При этом энергетическое положение максимума полосы ФЛ 2D обусловлены наличием пьезоэлектрического эффекта. При высокой интенсивности возбуждения генерируется высокая концентрация носителей в (In, Ga)As КН, которые экранируют пьезоэлектрическое поле, и, как следствие, полоса ФЛ (In, Ga)As КН сдвигается в высокоэнергетическую сторону спектра. Такое пьезоэлектрическое поле для плоскости (100) отсутствует. Это соответствует случаю 2D слоя, для которого энергетическое положение максимума и форма 2D полосы сохраняется при высокой интенсивности возбуждения. При увеличении интенсивности возбуждения дополнительно также наблюдается высокоэнергетическое уширение полосы ФЛ (In, Ga)As КН, что обусловлено наличием дисперсии размеров КН и флуктуациями компонентного состава и/или деформаций как в разных КН, так и вдоль одной КН. Высокоэнергетический сдвиг, обусловленный пьезоэлектри-

ческим эффектом, преимущественно реализуется в КН с высокой концентрацией индия, что, очевидно, отвечает (In, Ga)As КН больших размеров.

Таким образом, подобие характера изменения спектров ФЛ от интенсивности возбуждения и наличия пьезоэлектрического поля для исходного образца и отожженного при 850 °С является однозначным доказательством природы (In, Ga)As КН.

Нами также проведены температурные исследования ФЛ при низкой интенсивности возбуждения (0,1 Вт/см²). Известно, что уменьшение интегральной интенсивности ФЛ при росте температуры обусловлено термически активированными процессами рекомбинации на безызлучательных центрах, локализованных на гетерограницах (In, Ga)As КН или в окружающих слоях. Нормированная интенсивность ФЛ, представленная в полулогарифмическом масштабе, как функция температуры для исходного и отожженного при 850 °С образцов, приведена на рис. 5. Видно, что температурная зависимость заметно изменяется после БТО при 850 °С. Подобные изменения температурной зависимости ФЛ наблюдались для отожженных структур с (In, Ga)As КТ, что объяснялось изменением потенциала квантового (пространственного) ограничения [23].

В представленной температурной зависимости интенсивности ФЛ (In, Ga)As КН можно выделить три области:

- низкотемпературная область, где интенсивность ФЛ остается постоянной;
- область сильного термического гашения при высоких температурах, где зависимость имеет характер прямой линии, что отвечает экспоненциальному гашению люминесценции $\propto \exp(E_a/kT)$ в результате термического выброса носителей из КН. Наклон этой линии отвечает энергии активации E_a . Подобно структурам с КТ [24, 25], наклоны прямых участков на рис. 5 отвечают энергии активации относительно потенциала квантового (пространственного) ограничения в (In, Ga)As КН;
- промежуточная область, где проявляется резкий неэкспоненциальный спад интенсивности ФЛ (крутой изгиб на графике).

В нашем случае значение температурных интервалов обсуждаемых областей изменяется от образца к образцу. Сравнивая графики, приведенные на рис. 5, можно отметить две основных особенности:

- для исследуемых образцов энергия активации E_a , определенная в режиме сильного гашения, близка к энергетическому расстоянию между положением максимума ФЛ (In, Ga)As КН и шириной запрещенной зоны GaAs (высота барьера). Мы приписываем такое гашение ФЛ процессу захвата экситонов (In, Ga)As КН мелкими уровнями на гетероинтерфейсах КН—2D

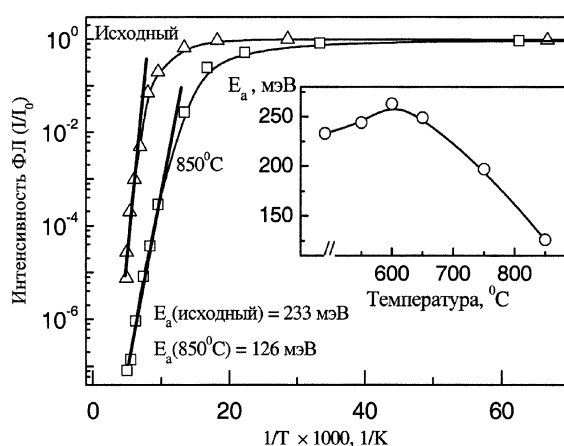


Рис. 5. Нормированная интенсивность ФЛ ($P_{\text{возб}} \approx 0,1$ Вт/см²) как функция $1/T$ для исходного и отожженного ($T_{\text{отж}} = 850$ °С) образцов. На вставке показана зависимость энергии активации E_a от температуры БТО; $T = 8$ К; $E_{\text{возб}} = 2,33$ эВ

слой, локализованных около GaAs барьера, со следующей их безызлучательной рекомбинацией на дефектных центрах;

- температура, при которой стартует гашение люминесценции, увеличивается с высотой потенциального барьера.

Мы установили, что в зависимости от температуры отжига (In, Ga)As КН E_a изменяется в пределах 263—126 мэВ (рис. 5, вставка), что может быть интерпретировано как изменение глубины и формы потенциала квантового ограничения в результате процессов интердиффузии при термическом отжиге.

Таким образом, уменьшение E_a при высоких температурах отжига обусловлено преимущественным уменьшением концентрации индия в (In, Ga)As КН.

Исследование поляризационных зависимостей излучения является очень важным для низкоразмерных систем, поскольку позволяет получить информацию об анизотропии их электронных состояний, что является необходимым требованием для их применений в поляризационно-чувствительных оптоэлектронных устройствах. Появление оптической анизотропии для структур с самоорганизованными (In, Ga)As КТ интерпретировалось на основе геометрической анизотропии формы КТ (степень линейной поляризации изменялась в пределах от 7 до 32 %) [26]. Поляризация излучения является собственной характеристикой КН и широко используется для их характеристики [27].

На рис. 6 показаны поляризационные спектры ФЛ исходного и отожженного при 850 °С образцов. Поляризация излучения (In, Ga)As КН не зависит от поляризации возбуждающего света. Это обусловлено тем, что при возбуждении с энергией кванта (2,33 эВ), большей чем ширина запрещен-

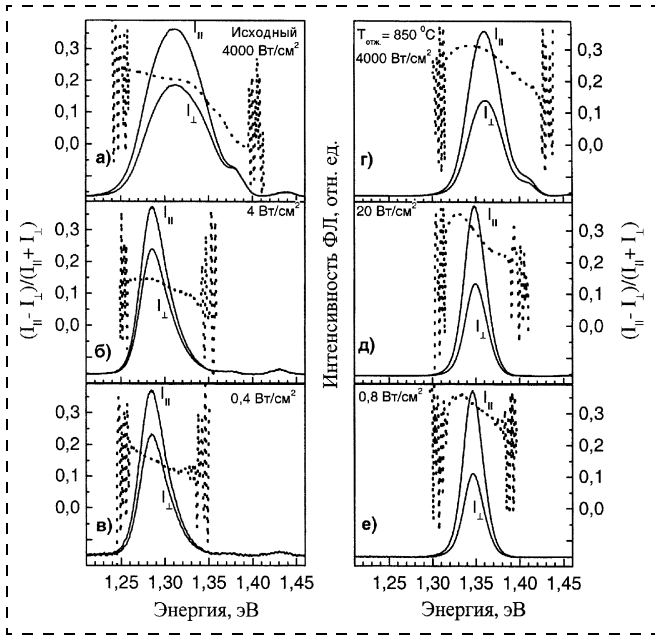


Рис. 6. Спектры ФЛ (In, Ga)As КН исходного (а–в) и отожженного при 850 °С (г–е) образцов при линейной поляризации излучения параллельно $I_{||}(I_{[0-11]})$ и перпендикулярно $I_{\perp}(I_{[011]})$ направлению ориентации КН для разных интенсивностей возбуждения. Пунктирной линией показана степень линейной поляризации $P = (I_{[0-11]} - I_{[011]}) / (I_{[0-11]} + I_{[011]})$; $T = 8$ К; $E_{\text{возб}} = 2,33$ эВ

ной зоны GaAs (1,5 эВ), фотовозбужденные носители, термализуясь на квантово-размерные уровни КН, теряют свою поляризационную память [28].

Направления максимальной и минимальной интенсивностей излучения мы определили из угловых зависимостей интегральной интенсивности полосы ФЛ и ориентации овальных дефектов [29]. Анализируя линейную поляризацию ФЛ, мы обнаружили сильную оптическую анизотропию излучения (In, Ga)As КН. Степень линейной поляризации ФЛ вдоль [0–11]-направления больше чем в [011]-направлении и зависит от энергии фотонов излучения (рис. 6). Она определялась как

$$P = (I_{[0-11]} - I_{[011]}) / (I_{[0-11]} + I_{[011]}),$$

где $I_{[0-11]}$ и $I_{[011]}$ — интенсивности ФЛ для линейных поляризаций параллельно [0–11] и [011] направлениям соответственно.

При низкой интенсивности возбуждения (рис. 6, в, е) значение P монотонно уменьшается с увеличением энергии фотонов излучения. Это обусловлено тем, что большие КН имеют большую анизотропию, чем малые. При высокой интенсивности возбуждения (рис. 6, а, г) мы не наблюдали поляризационной зависимости излучения для 2D слоя ($\approx 1,48$ эВ). Это позволяет нам утверждать, что оптическая анизотропия (In, Ga)As КН является

структурной анизотропией, т. е. обусловлена геометрической формой КН.

Интересно отметить, что для исходного образца (рис. 6, а–в) увеличение интенсивности возбуждения от 0,4 до 4000 Вт/см² приводит к росту степени поляризации P в максимуме полосы ФЛ от 14 до 19 % и значительно уменьшается зависимость P от энергии фотонов излучения в пределах полосы ФЛ. Это может быть объяснено следующим образом. При низкой интенсивности возбуждения форма полосы ФЛ КН определяется дисперсией их размеров. Если предположить, что вероятность заполнения уровней КН для всех КН одинакова (длина диффузии носителей в GaAs барьере и 2D слое больше, чем линейное расстояние между КН), то плавное уменьшение величины P может быть обусловлено влиянием рекомбинации носителей на дефектных центрах с изотропными излучательными свойствами, концентрация которых увеличивается (или увеличивается эффективность захвата на эти уровни) с уменьшением размеров КН. Увеличение мощности возбуждения вызывает:

- уменьшение вклада процессов рекомбинации фотовозбужденных носителей на дефектных центрах или изменение интенсивности полосы ФЛ, т. е. их насыщение (в обеих поляризационных конфигурациях);
- эффект заполнения более низкоэнергетических квантово-размерных уровней КН (отвечающих большим КН) и, соответственно, увеличение вклада в интенсивность ФЛ более высокоэнергетических уровней (отвечающих меньшим КН).

Отмеченные выше факты могут объяснить наблюдаемое увеличение P и уменьшение зависимости его значения от энергии фотонов излучения.

Очень важным эффектом, который проявился для отожженного образца (850 °С), есть значительный рост степени поляризации ($P \geq 30$ %) в пределах полосы ФЛ (рис. 6, в–е). При этом эффект уменьшения величины P с низкоэнергетической стороны полосы ФЛ может отвечать локализации экситонов на флуктуациях потенциала вдоль КН, что наблюдалось методом оптической спектроскопии ближнего поля [29]. В нашем случае мы не исключаем, что такие флуктуации потенциала вдоль КН обусловлены образованием областей подобных КТ (например цепочек КТ [30]). Более того, для КТ ожидается меньшее значение P и большая концентрация индия, что и может отвечать уменьшению величины P с низкоэнергетической стороны полосы ФЛ. Косвенным подтверждением правоты такого предположения является наличие в исходном образце небольших флуктуаций толщины вдоль (In, Ga)As КН (см. рис. 1, вставка).

На рис. 7 показана интенсивность полосы ФЛ (In, Ga)As КН в зависимости от угла линейной по-

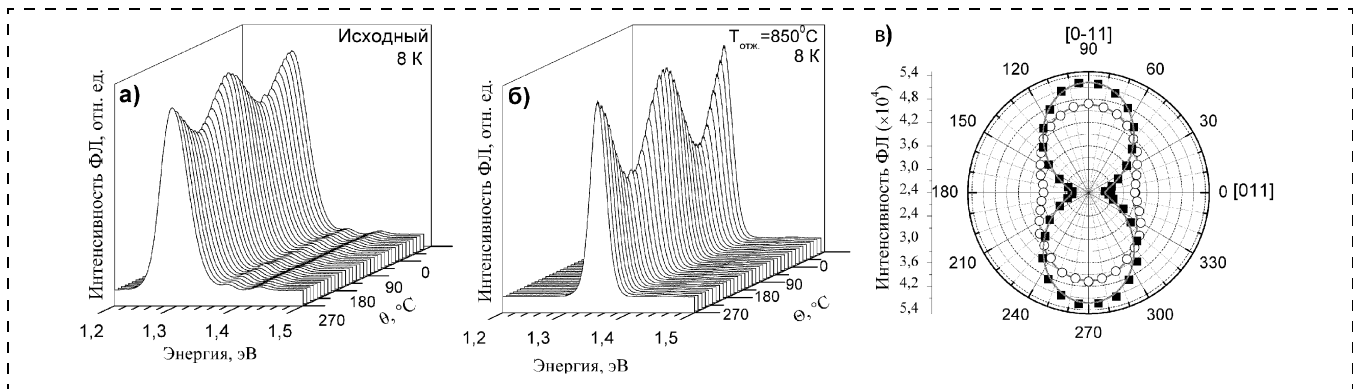


Рис. 7. Спектры ФЛ InGaAs КН исходного (а) и отожженного при 850 °С (б) образцов в зависимости от угла линейной поляризации и угловое распределение интенсивности излучения (в) линейно-поляризованного света структуры с КН, отмеченными относительно оси [011]; $T = 8$ К; $E_{\text{возб}} = 2,33$ эВ; $P_{\text{возб}} = 400$ Вт/см²

ляризации (Θ) относительно оси [011]. Эта зависимость хорошо аппроксимируется соотношением

$$I = I_{[0-11]} \sin^2 \theta + I_{[011]} \cos^2 \theta.$$

Отношение $I_{[0-11]}/I_{[011]}$ равняется 1,32 и 1,87 для исходного и отожженного (850 °С) образцов соответственно.

Максимальное и минимальное значение интенсивности ФЛ получено для [0—11] и [011] поляризации соответственно. Полученные результаты показывают, что (In, Ga)As КН имеют двойной симметричный потенциал КН с осями симметрии вдоль [0—11] и [011] направлений. Такую анизотропию связывают с эффектом смешивания тяжелых—легких дырок (Н—Л смешивание) валентной зоны, которое возникает в результате анизотропии формы КН (ориентации КН вдоль [0—11] направления) и анизотропии релаксации деформаций [19].

Таким образом, термический отжиг (In, Ga)As/GaAs КН (550—850 °С; 30 с) позволяет улучшить однородность размеров КН и увеличить степень линейной поляризации излучения. Проведенные исследования показали перспективность использования (In, Ga)As КН в новых оптоэлектронных устройствах.

Список литературы

1. Леденцов Н. Н., Устинов В. М., Шукин В. А., Копьев П. С., Алферов Ж. И., Бимберг Д. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры // Физика и техника полупроводников. 1998. Т. 32. № 4. С. 385—410.
2. Huang W., Jain F. Integrated InGaAs-InP quantum wire laser-modulators for 1,55-μm applications // Opt. Eng. — 2004. — Vol. 43, N 3. — P. 667—672.
3. Takeuchi M., Shiba K., Sato K., Huang H. K., Inoue K., and Nakashima H. Formation and Characterization of GaAs quantum wires at giant step edges on vicinal (110) GaAs surfaces // Japan J. Appl. Phys. 1995. Vol. 34. N. 8B. Part 1. P. 4411—4413.
4. Pan W., Yaguchi H., Onabe K., Ito R., Usami N. and Shiraki Y. Rectangular AlGaAs/AlAs Quantum Wires Using Spon-

taneous Vertical Quantum Wells // Japan J. Appl. Phys. 1996. Vol. 35. P. 1214—1216.

4. Notzel R., Ledentsov N. N., Daweritz L., Hohenstein M., and Ploog K. Direct synthesis of corrugated Superlattices on Non-(100)-Oriented Surfaces // Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 67. N 27. P. 3812—3817.

5. Ma W., Nötzel R., Trampert A., Ramsteiner M., Zhu H., Schönherr, and Ploog K. H. Self-organized quantum wires formed by elongated dislocation-free islands in (In, Ga)As/GaAs(100) // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 78. N 9. P. 1297—1299.

6. Yang H., Mu X., Zotova I. B., Ding Y. J., and Salamo G. J. Self-assembled InAs quantum wires on InP(001) // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. № 6. P. 3925—3927.

7. Leon R., Kim Y., Jagadish C., Gal M., Zou J., and Cockayne D. J. H. Effects of interdiffusion on the luminescence of InGaAs/GaAs quantum dots // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 69. N. 13. P. 1888—1890.

8. Xu S. J., Wang X. C., Chua S. J., Wang C. H., Fan W. J., Jiang J., Xie X. G. Effects of rapid thermal annealing on structure and luminescence of self-assembled InAs/GaAs quantum dots // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 72. N 25. P. 3335—3337; Xu S. J., Wang H., Li Q., Xie M. H., Fan W. J., Feng S. L. X-ray diffraction and optical characterization of interdiffusion in self-assembled InAs/GaAs quantum-dot superlattices // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 77. N. 14. P. 2130—2132.

9. Ryu S. W., Kim I., Choe B. D., and Jeong W. G. The effect of strain on the interdiffusion in InGaAs/GaAs quantum wells // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67. N 10. P. 1417—1419.

10. Lobo C., Leon R., Fafard S., and Piva P. G. Intermixing induced changes in the radiative emission from III—V quantum dots // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 72. N. 22. P. 2850—2852.

11. Selen L. J. M., van IJzendoorn L. J., de Voigt M. J. A., and Koenraad P. M. Evidence for strain in and around InAs quantum dots in GaAs from ion-channelling experiments // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 61, N 12. P. 8270—8275.

12. Ryu S. W., Kim I., Choe B. D., Jeong W. G. The effect of strain on the interdiffusion in InGaAs/GaAs quantum wells // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67, N 10. P. 1417—1419.

13. Lyster S. S., Legoues F. K. Thermal relaxation of pseudomorphic Si-Ge superlattices by enhanced diffusion and dislocation multiplication // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 65. N 12. P. 4693—4698.

14. Baribeau J. M., Pascual R., Saimoto S. Interdiffusion and strain relaxation in (Si_mGe_n)_p superlattices // Appl. Phys. Lett. 1990. Vol. 57. N 15. P. 1502—1504.

15. Johansson J., Seifert W., Zwiller V., Junno T., and Samuelson L. // Appl. Surf. Sci. 1998. Vol. 134. N 47.

16. Wang Z. M., Holms K., Mazur Yu. I. and Salamo G. J. Fabrication of (In, Ga)As quantum-dot chains on GaAs(100) // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84. N 11. P. 1931—1933.
17. Cusack M. A., Briddon P. R., and Jaros M. Electronic structure of InAs/GaAs self-assembled quantum dots // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 54. N 4. P. R2300—R2303.
18. Wu J., Zeng Y. P., Sun Z. Z., Lin F., Xu B., Wang Z. G. Self-assembled InAs quantum wires on InP(001) // J. Cryst. Growth. 2000. Vol. 219. P. 180—183.
19. Notomi M., Hammersberg J., Zeman J., Weman H., Potemski M., Sugiura H., and Tamamura T. Polarization and Broken Symmetry due to Anisotropic "Triaxial" Strain States in Lattice-Mismatched Quantum Wires // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol. 80. N 14. P. 3125—3128.
20. Heitz R., Kalburge A., Xie Q., Grundmann M., Chen P., Hoffmann A., Madhukar A., Bimberg D. Excited states and energy relaxation in stacked InAs/GaAs quantum dots // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 57. N 15. P. 9050—9060.
21. Grundmann M., Ledentsov N. N., Stier O., Bimberg D., Ustinov V. M., Kop'ev P. S., and Alferov Zh. I. Excited states in self-organized InAs/GaAs quantum dots: Theory and experiment // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 68. N 7. P. 979—981.
22. Tribe W. R., Steer M. J., Mowbray D. J., Skolnick M. S., Forshaw A. N., Roberts J. S., Hill G., Pate M. A., Whitehouse C. R., Williams G. M. Emission mechanisms and band filling effects in GaAs-AlGaAs V-groove quantum wires // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 70. N 8. P. 993—995.
23. Le Ru E. C., Fack J., and Murray R. Temperature and excitation density dependence of the photoluminescence from annealed InAs/GaAs quantum dots // Phys. Rev. B. 2003. Vol. 67. P. 245318-1—245318-12.
24. Lambkin J. D., Dunstan D. J., Homewood K. P., Howard L. K., and Emeny M. T. Thermal quenching of the photoluminescence of InGaAs/GaAs and InGaAs/AlGaAs strained-layer quantum wells // Appl. Phys. Lett. 1990. Vol. 57. N 19. P. 1986—1988.
25. Bacher G., Schweizer H., Kovac J., Forchel A., Nickel H., Schlapp W., and Losch R. Influence of barrier height on carrier dynamics in strained $\text{In}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum wells // Phys. Rev. B. 1991. Vol. 43. N 11. P. 9312—9315.
26. Saito H., Nishi K., Sugou S., Sugimoto Y. Controlling polarization of quantum-dot surface-emitting lasers by using structurally anisotropic self-assembled quantum dots // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71. N 5. P. 590—592; Y. Natebani, T. Ishikawa, S. Noda, A. Sakaki, J. Appl. Phys. 76 (1994) 347; M. Henini, S. Sanguinetti, S. C. Fortina, E. Grilli, M. Guzzi, G. Panzarini, L. C. Andreani, M. D. Abward, P. Moliarti, P. H. Beton, L. Eaves. Optical anisotropy in arrow-shaped InAs quantum dots // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 57. N 12. P. R6815—R6818; W. Yang, H. Lee, T. J. Johnson, P. C. Sercel, A. G. Normn. Electronic structure of self-organized InAs/GaAs quantum dots bounded by $\{136\}$ facets // Phys. Rev. B. — 2000. — Vol. 61, N 4. P. 2784—2793.
27. Tsuchiya M., Gains J. M., Yan R. H., Simes R. J., Holtz P. O., Coldren L. A., and Petroff P. M. Optical Anisotropy in a Quantum-Well-Wire Array with Two-Dimensional Quantum Confinement // Phys. Rev. Lett. 1989. Vol. 62, N 4. P. 466—469.
28. Sugisaki M., Ren H.-W., Nair S. V., Nishi K., Sogou S., Okuno T., and Matsumoto Y. Optical anisotropy in self-assembled InP quantum dots // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 59. N 8. P. R5300—R5303.
29. Grottini A., Staehli J. L., Deveaud B., Wang X., and Ogura M. Near-field imaging of one-dimensional excitons delocalized over mesoscopic distances // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 63, N 3. P. R121313-1—R121313-4.
30. Wang Z. M., Holmes K., Mazur Yu. I., and Salamo G. J. Fabrication of (In, Ga)As quantum-dot chains on GaAs(100) // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84. N 11. P. 1931—1933.

УДК 548.732

Л. В. Левонян,
Ереванский государственный университет,
Республика Армения

ФОРМИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ФАЗОВОГО КОНТРАСТА В УСЛОВИЯХ ДИФРАКЦИОННОЙ ФОКУСИРОВКИ СФЕРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

Обсуждается возможность восстановления внутренней структуры одномерных фазовых объектов (ФО) в условиях дифракционной фокусировки рентгеновской сферической волны. В качестве монокристалла-анализатора используется сильнопоглощающий клиновидный кристалл с ребром, параллельным вектору дифракции, при симметричной лауэвской геометрии. Показано, что перемещением ФО вдоль направления вектора дифракции с шагом, меньшим, чем размеры фокуса, можно привести в условия фокусировки разные части ФО. Регистрируя всю карту данных, можно восстановить приобретенную в ФО добавочную фазу волны.

Изучение внутренней структуры слабопоглощающих некристаллических веществ, а также биологических объектов проводится методом рентгеновского фазового контраста (ФК), который в настоящее время бурно развивается. Задачей ФК является не только получение изображения фазового объекта (ФО), но и его расшифровка, т. е. решение обратной задачи [1, 2].

В настоящей работе обсуждается возможность восстановления внутренней структуры одномерных ФО в условиях дифракционной фокусировки рентгеновской сферической волны.

Как известно, при падении на кристалл монокроматической рентгеновской сферической волны при лауэвской геометрии, дифрагированное излучение фокусируется внутри кристалла [3—5].

Амплитуда дифрагированной волны на глубине z в кристалле согласно обобщенной динамической теории [6], определяется сверткой

$$D_h(x, z) = \int_{-z \tan \theta_B}^{z \tan \theta_B} dx' D^j(x - x') G_h(x', z), \quad (1)$$

где θ_B — угол Брэгга для рентгеновской волны с длиной λ ; $D^j(x)$ — амплитуда падающего излучения на входной поверхности кристалла; $G_h(x, z)$ — функция Грина дифрагированной волны.

Пусть перед входом в кристалл излучение от точечного источника S , находящегося на расстоянии

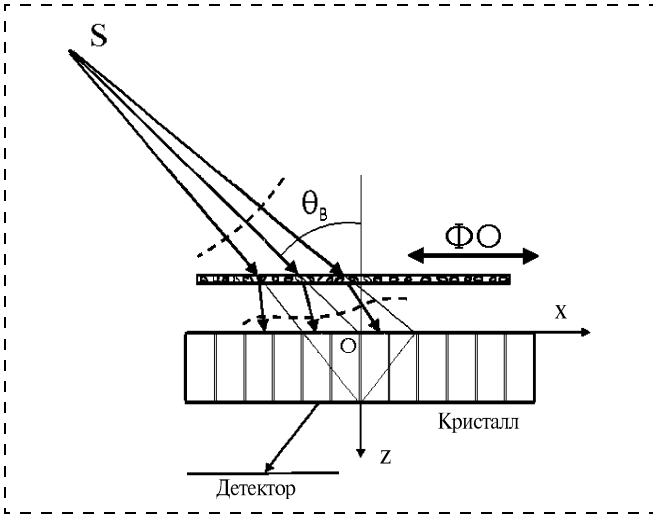


Рис. 1. Схема дифракции. Штриховыми линиями изображен волновой фронт до и после ФО

L от кристалла, проходит через ФО, в котором неоднородности распределены одномерно (рис. 1).

Координатная система выбрана следующим образом: начало координат O на поверхности кристалла есть точка падения луча под точным брэгговским углом θ_B , входная поверхность кристалла совпадает с плоскостью $z = 0$, а отражающие плоскости соответствуют плоскостям $x = \text{const}$, ось y перпендикулярна плоскости рассеяния.

Амплитуда падающего излучения в плоскости рассеяния $y = 0$

$$D^i(x) = \frac{1}{L} \exp \left[i \frac{k \cos^2 \theta_B}{2L} x^2 + i \varphi_{\Phi O}(x) \right], \quad (2)$$

где k — волновое число, $k = 2\pi/\lambda$; $\varphi_{\Phi O}(x)$ — добавочная фазовая функция волны, приобретенной при прохождении через ФО. Предполагается, что ФО слабопоглощающий, т. е. интенсивность пучка при прохождении через него практически не меняется, меняется лишь фаза.

В случае симметричной геометрии Лауэ функция Грина дифрагированной волны $G_h(x, z)$ для сильно поглощающего кристалла приобретает вид [6, 7]

$$G_h(x, z) = A \frac{e^{iPz}}{\sqrt{z}} \exp(-iQx^2/z), \quad (3)$$

где

$$P = k(\chi_0 + C\chi_h)/2 \cos \theta_B; \\ Q = kC\chi_h \operatorname{ctg} \theta_B / 4 \sin \theta_B; \quad A = \sqrt{iQ}/2;$$

χ_0 и χ_h — Фурье-компоненты комплексной поляризуемости кристалла; $\chi = \chi_r + i\chi_i$; C — фактор поляризации; $C = 1$ для σ -поляризации, и $C = \cos 2\theta_B$ для π -поляризации.

При выводе (3) полагалось, что кристалл центросимметричный, т. е. $\chi_h = \chi_{\bar{h}}$.

Для точки с координатами (x, z) на выходной поверхности кристалла основной вклад в интеграл (1) в случае сильно поглощающего кристалла дают точки входной поверхности, для которых $x - x' \approx x$. Поэтому фазу $\varphi_{\Phi O}(x - x')$ на поверхности кристалла разложим в ряд Тейлора в окрестности точки x , ограничиваясь членами второго порядка малости:

$$\begin{aligned} \varphi_{\Phi O}(x - x') = \\ = \varphi_{\Phi O}(x) - \varphi'_{\Phi O}(x)x' + \frac{1}{2} \varphi''_{\Phi O}(x)x'^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\varphi'_{\Phi O}(x)$ и $\varphi''_{\Phi O}(x)$ — первая и вторая производные функции $\varphi_{\Phi O}(x)$, соответственно; $\varphi'_{\Phi O}(x) = k\Delta\theta_{\Phi O}(x)$, где $\Delta\theta_{\Phi O}(x)$ — локальное смещение от угла Брэгга, обусловленное рефракцией на неоднородностях ФО, а $\varphi''_{\Phi O}(x)$ связано с локальным изменением кривизны волнового фронта вследствие рефракции.

Подставляя (2)–(4) в (1) и проводя интегрирование, для распределения интенсивности дифрагированного поля в фокальной области получим

$$\begin{aligned} I_h(x, y, z) = \\ = \frac{\lambda \exp[-\mu z(1 - C|\chi_{hi}|/\chi_{oi})/\cos \theta_B]}{8\Lambda L \sin^2 \theta_B [(z_F - z + z\varphi''_{\Phi O}(x)(\Lambda z_F/\pi) \operatorname{tg}^2 \theta_B)^2 + z^2(|\chi_{hi}|/|\chi_{hr}|)^2]^{\frac{1}{2}}} \times \\ \times \exp \left[-\pi \frac{z}{\Lambda} (|\chi_{hi}|/|\chi_{hr}|) \times \right. \\ \left. \times \frac{(x + \varphi'_{\Phi O}(x)(\Lambda z_F/\pi) \operatorname{tg}^2 \theta_B) \operatorname{ctg}^2 \theta_B}{(z_F - z + z\varphi''_{\Phi O}(x)(\Lambda z_F/\pi) \operatorname{tg}^2 \theta_B)^2 + z^2(|\chi_{hi}|/|\chi_{hr}|)^2} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где μ — коэффициент линейного поглощения, $\mu = 2\pi\chi_{oi}/\lambda$; Λ — экстинкционная длина, $\Lambda = (\lambda \cos \theta_B)/(C|\chi_{hr}|)$; z_F — фокальная глубина в кристалле при отсутствии ФО; $z_F = (|\chi_{hr}| \times CL)/(\sin \theta_B \sin 2\theta_B)$.

Из выражения (5) следует, что распределение интенсивности в дифрагированном изображении имеет гауссовский вид при толщинах, близких к значению z_F , причем наиболее узкий и высокий пик при отсутствии ФО возникает на центральной траектории $x = 0$ при $z = z_F$. В этой точке интенсивность фокусирующегося волнового поля

$$\begin{aligned} I_h^{\max} = (|\chi_{hr}|/|\chi_{hi}|)/(4L^2) \times \\ \times \exp[-\mu z_F(1 - C|\chi_{hi}|/\chi_{oi})/\cos \theta_B], \end{aligned} \quad (6)$$

т. е. примерно в $I_h^{\max} = (|\chi_{hr}|/|\chi_{hi}|)/4$ раз больше, чем интенсивность падающей волны. Напомним, что дан-

ный фокус линейный — фокальная линия параллельна оси y .

Поперечная ширина фокальной линии Δ вдоль оси x , определяемая на высоте, на которой интенсивность уменьшается в e раз, будет

$$\Delta = [(\Lambda z_F / \pi)(|\chi_{hi}|/|\chi_{hr}|)]^{1/2} \operatorname{tg} \theta_B. \quad (7)$$

В обычных экспериментальных условиях Δ составляет несколько микрон.

Из выражения (5) можно оценить также продольный размер фокальной области вдоль оси z . Он может быть на порядок больше, чем Δ .

При прохождении волны через ФО условия фокусировки нарушаются: вследствие рефракции на неоднородностях лучи меняют свои направления и волновой фронт деформируется (см. рис. 1). Первому соответствует наличие $\varphi'_{FO}(x)$ в выражении (5), а второму — $\varphi''_{FO}(x)$. Обозначим фокальную глубину в кристалле при наличии ФО через z_{FO} , которая согласно (5) определяется из условия:

$$z_F - z_{FO} + z_{FO} \varphi''_{FO}(x) (\Lambda z_F / \pi) \operatorname{tg}^2 \theta_B = 0. \quad (8)$$

Соотношение (8) можно переписать в виде формулы линзы:

$$\frac{1}{L} - \frac{\lambda \varphi''_{FO}(x)}{2\pi \cos^2 \theta_B} = \frac{C|\chi_{hr}|}{\sin \theta_B \sin 2\theta_B} \frac{1}{z_{FO}}. \quad (9)$$

Очень важно отметить, что так как для излучения с длиной волны $\lambda \approx 1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ нм}$ коэффициент преломления $n(x) = 1 - \delta(x)$ очень мало отличается от единицы ($\delta \approx 10^{-5} \div 10^{-6}$), то при прохождении через ФО неоднородности с размерами Δx_{FO} , согласно (2) деформируют падающий на кристалл волновой фронт, радиус кривизны которого при отсутствии ФО равен L , на величину, порядка $\Delta x_{FO}/\delta$. Другими словами, если для фокусировки сферической волны с радиусом кривизны фронта, равным L , необходим кристалл с толщиной z_F , то для волны с радиусом кривизны фронта $L + \Delta x_{FO}/\delta$ потребуется кристалл с толщиной z_{FO} , определяемой из формулы (9).

Допустим, что при прохождении через ФО значение дополнительной фазы порядка $|\varphi_{FO}(x)| \approx 1$, а размер неоднородностей порядка $\Delta x_{FO} \approx 10^{-2} \text{ см}$. Тогда для $\varphi'_{FO}(x)$ и $\varphi''_{FO}(x)$ имеем $|\varphi'_{FO}(x)| \approx 10^2 \text{ см}^{-1}$, $|\varphi''_{FO}(x)| \approx 10^4 \text{ см}^{-2}$.

Поскольку точность при определении $\varphi''_{FO}(x)$ может быть на два порядка меньше, чем при определении $\varphi'_{FO}(x)$, то такую возможность может предоставить сечение фокальной линии под небольшим углом, что соответствует использованию в качестве кристалла-анализатора клиновидного кристалла с ребром, параллельным вектору дифрак-

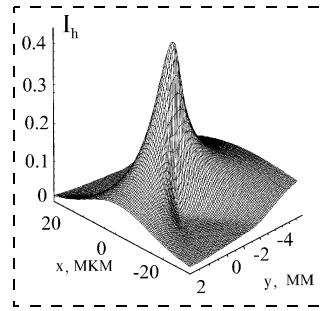


Рис. 2. Распределение интенсивности фокусирующегося волнового поля для клиновидного кристалла; угол клина равен 6°

ции. Толщина клиновидного кристалла равна $z = z_F + y \operatorname{tg} \alpha$, где α — угол клина.

В качестве примера на рис. 2 приведен случай отражения $\text{CuK}\alpha_1$ излучения от плоскостей (220) Ge, $z_F = 1,6 \text{ мм}$, $\alpha = 6^\circ$. Из рис. 2 видно, что фокусные размеры по y почти на два порядка больше, чем по x .

Из формулы (5) следует, что для любой точки ФО обеспечение фокусировки возможно, если компенсировать величину $\varphi'_{FO}(x)$ вдоль оси x , а $\varphi''_{FO}(x)$ — вдоль оси y .

Поскольку ФО одномерный, смещая его вдоль x на такое расстояние, чтобы выполнялось условие

$$\varphi'_{FO}(x) = -x_1 / ((\Lambda z_F / \pi) \operatorname{tg}^2 \theta_B), \quad (10)$$

на оси y найдется точка y_1 , где

$$\varphi''_{FO}(x) = -y_1 \operatorname{tg} \alpha / ((z_F + y_1 \operatorname{tg} \alpha) (\Lambda z_F / \pi) \operatorname{tg}^2 \theta_B), \quad (11)$$

и таким образом излучение будет сфокусировано. При этом шаг по x нужно выбрать меньше, чем Δ .

Для обеспечения дифракционной фокусировки важно, чтобы вокруг точки x_1 в плоскости рассеяния кривизна падающей сферической волны была больше, чем локальная кривизна неоднородности, т. е.

$$\frac{1}{L} > \frac{\lambda |\varphi''_{FO}(x)|}{2\pi \cos^2 \theta_B}. \quad (12)$$

Если расстояние источник—кристалл $L \approx 10^4 \text{ см}$, что соответствует рассмотрению излучения от синхротронного источника, то область на поверхности кристалла, определяемой шириной кривого отражения, порядка $\Delta x \approx 10^{-2} \text{ см}$. Для сильно поглощающего кристалла Δx еще меньше. В этом случае падающее излучение "почувствует" неоднородность локально, т. е. ее часть.

При указанных значениях параметров фокальная глубина при отсутствии ФО z_F — порядка миллиметра. При наличии ФО фокусная глубина z_{FO} будет зависеть от координаты x : $z_{FO} = z_{FO}(x)$, и при тех же значениях параметров будет отличаться от z_F долями миллиметра.

Наблюдаемая интенсивность определяется, как

$$I_h = (|\chi_{hr}|/|\chi_{hi}|) \times \frac{\lambda \exp[-\mu(z_F + y_1 \operatorname{tg} \alpha)(1 - C|\chi_{hi}|/\chi_{oi})/\cos \theta_B]}{8 \Lambda L \sin^2 \theta_B (z_F + y_1 \operatorname{tg} \alpha)}. \quad (13)$$

Если $|y_1| \operatorname{tg} \alpha \ll z_F$, то при выполнении условий (10) и (11) для каждой точки ФО в отдельности, практически все точки ФО будут давать примерно одинаковые фокусные изображения. Отметим, что в этом случае значение координаты y_1 , которая важна в (11), не так важна в (13). Компьютер, присоединенный к детектору, может запомнить всю карту данных $(x_1; y_1)$ для точек ФО, что позволит восстановить функцию $\varphi_{\text{ФО}}(x)$. Поворачивая ФО на 180° вокруг оси z и проведя вышеуказанные исследования повторно, можно восстановить внутреннюю структуру ФО.

Список литературы

1. Бушуев В. А., Сергеев А. А. Обратная задача в методе рентгеновского фазового контраста // Письма в Журнал технической физики. 1999. Т. 25. Вып. 3. С. 1–7.
2. Bronnikov A. V. Reconstruction formulas in phase-contrast tomography // Optics Communications. 1999. Vol. 171. P. 239–244.
3. Афанасьев А. М., Кон В. Г. Динамическая теория дифракции сферической рентгеновской волны. Общий формализм // Физика твердого тела. 1977. Т. 19. Вып. 6. С. 1775–1783.
4. Левонян Л. В. О дифракционной фокусировке рентгеновских лучей // Письма в журнал технической физики. 1981. Т. 7. Вып. 5. С. 269–272.
5. Levonian L. V. Interference fringers of intrabranched scattering of x-ray spherical-wave diffraction in a perfect crystal // Physica status solidi (a). 1981. V. 68. P. k199–k202.
6. Пинскер З. Г. Рентгеновская кристаллооптика. М.: Наука, 1982. 392 с.
7. Слободенский И. Ш., Чуховский Ф. Н. К динамической теории дифракции пространственно-неоднородного пучка рентгеновских лучей в идеальном кристалле // Кристаллография. 1970. Т. 15. Вып. 6. С. 1101–1107.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 51.007.57

В. А. Карташев, д-р физ.-мат. наук., проф., Т. Ф. Бурухина, Институт прикладной математики РАН, vakart@keldysh.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОТКЛОНЕНИЙ ИГЛЫ ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА ОТ НАКЛОНА ЕГО ОСИ

Исследуется зависимость смещения иглы туннельного микроскопа от наклона его оси. Эта зависимость должна учитываться на этапе проектирования и в процессе интерпретации измерений. Проведенные эксперименты подтверждают правильность выбранной модели для объяснения зависимости.

Туннельный микроскоп позволяет исследовать поверхность с разрешением менее 0,1 нм. При таком разрешении становятся различимы атомы поверхности исследуемого материала.

Не менее важной возможностью является способность туннельного микроскопа осаждать на поверхность молекулы вещества, которое окружает иглу. Это достигается с помощью кратковременного электрического раз-

ряда между иглой и поверхностью. При этом удается формировать объекты с точностью до 1 нм.

Таким образом, при использовании туннельного микроскопа критическими размерами являются размеры менее 0,1 нм и 1 нм. Такие расстояния являются непривычно малыми даже для современной техники и их достижение связано с определенными трудностями при разработке и

эксплуатации туннельных микроскопов.

Причина затруднений состоит в необходимости уменьшить до приемлемого значения амплитуды возмущений, которые действуют на туннельный микроскоп со стороны внешней среды. Традиционные решения являются слишком громоздкими, технологически сложными и, как следствие, дорогими.

В этой связи представляет интерес исследование механизмов действия возмущений на положение иглы микроскопа.

В работе [1] показано, что помимо традиционных механизмов действия возмущений, связанных с колебаниями конструкции микроскопа, существует также нетрадиционный механизм, связанный со вторичными эффектами. Его действие обусловлено изменениями деформации конструкции микроскопа при наклоне оси.

В традиционной технике действие таких факторов чрезвычайно мало и поэтому может служить

оправданием для пренебрежения ими. Однако они оказываются существенными при измерениях с разрешением меньше 1 нм.

Настоящая работа посвящена исследованию зависимости перемещения иглы от наклона оси микроскопа. Эта зависимость определяет чувствительность перемещений иглы к наклону (в статике) и раскачиваниям (в динамике) оси микроскопа.

В статье рассмотрены два микроскопа: конструкции Наносцентра и конструкции НПО "АЛМАЗ". Оба прибора основаны на измерении рельефа поверхности с использованием туннельного эффекта.

Для обоих приборов выявлена целесообразность увеличения жесткости их измерительных частей, которое позволило бы существенно уменьшить влияние внешних воздействий (например, колебаний основания). Просчет в проектировании приборов, по-видимому, связан с отсутствием у конструкторов достаточного опыта в масштабировании представлений окружающего нас мира к размерам наномира.

Предлагаемая работа ставит перед собой две цели:

- получить оценки перемещений иглы при изменении вектора силы тяжести;
- подготовить математическое обоснование экспериментов по измерению этой зависимости на приборах.

Результаты расчетов показывают, что смещение иглы соизмеримо с 1 мкм по каждому из направлений. Кроме того, имеется взаимозависимость между направлениями. Она проявляется в том, что смещение вектора силы тяжести вдоль горизонтальной оси приводит к отклонениям иглы по вертикали.

Эксперименты, выполненные на туннельном микроскопе, подтвердили наличие зависимости отклонений иглы от наклона его оси с точностью до порядка величин, причем предсказанное и

измеренное значения оказались в достаточной мере близки.

Математическая модель зависимости наклона оси туннельного микроскопа от наклона его основания

Наиболее вероятными воздействиями на микроскоп являются такие, которые приводят к колебаниям основания и наклону его оси. Влияние первых представлено в работе [2]. Рассмотрим зависимость перемещения иглы от наклона основания.

Зависимость перемещения иглы от наклона основания туннельного микроскопа возникает в результате деформации цепочки конструктивных элементов, которые соединяют площадку для размещения исследуемых образцов с иглой.

Высокие требования, предъявляемые к точности движения иглы туннельного микроскопа, вынуждают разработчиков применять специальные технические решения, которые обеспечивают уменьшение влияния внешних возмущающих факторов механической природы. В туннельном микроскопе конструкции Наносцентра для этого используется мягкий пружинный подвес.

По этой причине перед тем, как перейти к расчету зависимости перемещения иглы от наклона оси микроскопа, необходимо определить, насколько пружинный подвес уменьшает угол наклона основания.

Конструкция туннельного микроскопа Наносцентра. На рис. 1 изображена схема туннельного

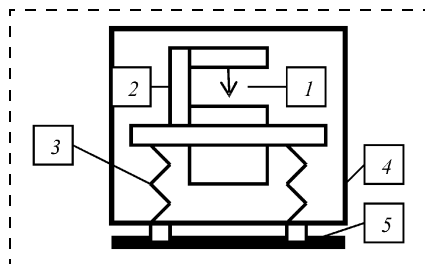


Рис. 1

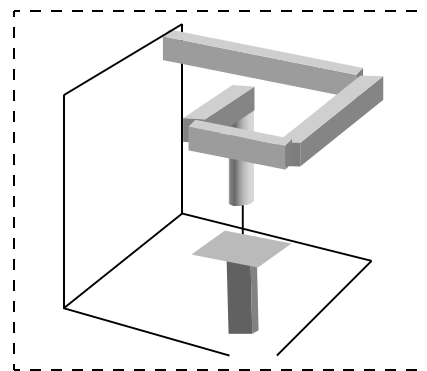


Рис. 2

микроскопа конструкции Наносцентра. Он состоит из блока пьезодвигателей 2, которые приводят в движение иглу 1, пружинного подвеса 3, кожуха 4, опор 5.

Пьезодвигатели обеспечивают грубое (с шагом 0,3 мкм) и точное (с шагом 0,1 нм) перемещения иглы. Блок представляет собой балочную конструкцию (рис. 2), на конце которой (в виде цилиндра) располагаются пьезодвигатели и игла.

Стол с исследуемым образцом находится снизу. Он опирается на привод грубого вертикального перемещения.

Пружинный подвес обеспечивает уменьшение влияния внешних воздействий на измерительную часть микроскопа. Для увеличения эффективности действия пружины в подвесе сделаны достаточно мягкими: их коэффициент упругости равен всего 40 Н/м.

Балочная конструкция выполнена в виде алюминиевых стержней с сечением 1×1 см и длиной 5 см. В работе [1] показано, что деформация стержней под действием силы тяжести приводит к прогибу конструкции на 1 мкм. Этот прогиб компенсируется при настройке микроскопа путем подъема стола с исследуемым образцом до появления туннельного тока.

Туннельный ток возникает при расстоянии 0,5 нм между иглой и образцом. Малый размер этого зазора приводит к тому, что процесс измерения оказывается

весьма чувствительным к действию внешних возмущений. Ввиду сложной геометрии распределения масс расчет влияния возмущений оказывается достаточно сложной задачей. Эта задача дополнительно усложняется тем, что использующиеся для вычислений формулы выведены в линейных приближениях, так как значения членов, которыми пренебрегают, обычно имеют порядок нанометров. В итоге в расчетах с точностями порядка нанометров приходится учитывать вторичные эффекты. Например, оказалось [1], что раскачивание оси микроскопа при колебаниях основания приводит к наклону оси измерительного блока и вследствие этого к отклонениям иглы в силу изменений деформаций под действием силы тяжести. Расчеты показали, что вклад этого эффекта в амплитуду колебаний иглы на порядок больше, чем при поступательных колебаниях, которые обычно исследуются в расчетах.

Математическая модель изменения угла наклона оси микроскопа. Определим, насколько пружинный подвес уменьшает угол наклона основания. Для этого решим задачу статики в предположении, что угол наклона опоры мал.

Введем следующие обозначения:

$O_a X_a Z_a$ — абсолютная система координат;

$O_o X_o Z_o$ — абсолютная система координат, связанная с опорой (точка O_o совпадает с серединой основания);

O_m — центр пружинного подвеса;

$O_m X_m Z_m$ — система координат, связанная с микроскопом;

α — угол наклона опоры, отсчитываемый от вертикали;

β — угол наклона системы координат $O_m X_m Z_m$ относительно системы координат $O_o X_o Z_o$, отсчитываемый от вертикали;

m — масса микроскопа;

mg — вектор силы тяжести;

N_1 и N_2 — векторы сил давления пружин на микроскоп;

h — вектор центра масс в осях $O_m Z_m$ (предполагается, что он направлен по оси $O_m Z_m$);

l — расстояние от точки O_m до точки подвеса микроскопа.

Отклонение оси микроскопа от вертикали приводит к неравномерному сжатию пружин. В результате угол β отличается от угла α .

В векторной форме задача статики, описывающая наклоненное положение микроскопа, содержит уравнение равенства сил и моментов. Запишем их в векторной форме. Баланс сил, действующих на микроскоп,

$$N_1 + N_2 + mg = 0.$$

Баланс моментов сил относительно точки O_e

$$[h, mg] + [l_1, N_1] + [l_2, N_2] = 0.$$

Запишем эти уравнения в координатной форме в абсолютных осях $O_o X_o Z_o$. Напомним, что они связаны с опорой и наклонены вместе с ней на угол α . Рассматриваемая задача эквивалентна задаче, в которой микроскоп располагается вертикально, а сила тяжести направлена под углом к вертикальной оси.

В проекции на оси $O_o X_o$ и $O_o Z_o$ равенство сил приводится к виду

$$\begin{aligned} N_1 x + N_2 x &= mg \sin \alpha, \\ N_1 z + N_2 z &= -mg \cos \alpha. \end{aligned}$$

Принимая во внимание малость угла α , с точностью до членов второго порядка получим

$$\begin{aligned} N_1 x + N_2 x &= mg \alpha, \\ N_1 z + N_2 z &= -mg. \end{aligned}$$

Левая и правая пружины находятся в одинаковых условиях, поэтому горизонтальные составляющие сил сжатия пружин пропорциональны смещению центра микроскопа — точки O_m , относительно центра основания — точ-

ки O_o . При малых значениях угла наклона опоры можем записать

$$N_1 x = N_2 x = Nx \approx -kd,$$

где k — коэффициент упругости пружин; d — смещение центра микроскопа, которое имеет порядок угла наклона опоры.

Вертикальные составляющие отличаются от половины силы тяжести на величину дополнительного сжатия правой пружины и растяжения левой пружины, которое вызывается действием момента силы тяжести. При малых углах наклона опоры

$$N_2 z \approx -\frac{mg}{2} + kl\beta;$$

$$N_1 z \approx -\frac{mg}{2} - kl\beta.$$

В этих выражениях предполагается, что коэффициенты упругости пружин равны как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях.

В линейном приближении (для малых углов α и β) момент сил натяжения пружин относительно оси $O_m Y_m$ определяется выражением

$$-lN_1 z + lN_2 z + lN_1 x\beta - lN_2 x\beta.$$

С учетом малости горизонтальных составляющих сил давления пружин на микроскоп в линейном приближении для их момента относительно оси $O_m Y_m$ получаем

$$l(-N_1 z + N_2 z) + l\beta(N_1 x - N_2 x) = -2l^2 k\beta.$$

Вычисления показывают, что момент силы тяжести относительно оси $O_m Y_m$ определяется равенством

$$[h, mg]_y = hmg(\alpha + \beta).$$

Таким образом, равенство моментов приводится к виду

$$-2l^2 k\beta + hmg(\alpha + \beta) = 0.$$

Из этого уравнения

$$\beta = \frac{hmg\alpha}{2l^2 k - hmg}.$$

Вернемся к исследованию угла наклона оси микроскопа относительно вертикали при наклоне основания. Этот угол равен сумме углов α и β . Обозначим через γ угол наклона оси микроскопа относительно оси $O_a Z_a$. Исходя из полученных соотношений, получим

$$\gamma = \alpha + \beta = \frac{2l^2 k \alpha}{2l^2 k - hmg} = \frac{\alpha}{1 - \frac{hmg}{2l^2 k}}.$$

Подставляя параметры, которые соответствуют микроскопу [1] ($l = 5$ см, $h = -2$ см, $mg = 10$ Н, $k = 10$ Н/м), находим $\gamma \approx 0,1\alpha$.

Это означает, что пружинный подвес достаточно хорошо компенсирует наклон основания микроскопа, так как угол наклона его оси уменьшается на порядок.

Исследование зависимости отклонения иглы от наклона опоры туннельного микроскопа

Наклон оси микроскопа приводит к изменению ориентации силы тяжести по отношению к конструкции микроскопа. В результате изменяются деформации в конструкции и, как следствие, возникает отклонение иглы от того положения, которое она занимала в начале сканирования.

Направление и величина этих отклонений зависят от конструкции микроскопа. Они могут быть вычислены при использовании известных формул сопротивления материалов и теории упругости. При исследовании влияния прогиба конструкции под действием силы тяжести они были вычислены в работе [2]. Исследование показало, что прогиб конструкции должен учитываться при расчете перемещений иглы, вызванных динамическими возмущениями в горизонтальной плоскости, которые приложены к основанию. Действие силы тяжести сказывается при раскачивании оси микроскопа, которое возникает вследствие сжатия и растя-

жения пружин подвеса при колебаниях основания в горизонтальной плоскости, которые вызываются возмущениями.

Ниже исследуется зависимость смещения иглы туннельного микроскопа от угла наклона его основания. Эта зависимость определяется эллипсом перемещений иглы под действием силы тяжести конструкции узла, к которому игла крепится.

В работе [2] вычислена полуось эллипсоида, направленная вдоль вертикальной оси. По сравнению с точностью измерений, проводящихся с помощью туннельного микроскопа (0,1 нм), ее значение оказалось достаточно большим — порядка 1 мкм.

Ниже вычисляется одна из двух горизонтальных полуосей и даются оценки допустимой подвижности опоры, при которых обеспечиваются требуемая точность работы микроскопа.

Вычисление отклонения иглы под действием горизонтальной составляющей силы тяжести. Действие силы тяжести вызывает деформацию конструкции микроскопа. Перемещение иглы, которое при этом возникает, учитывается при выведении иглы в рабочее положение.

Изменение вектора действия силы тяжести изменяет деформации конструкции микроскопа. Возникающие при этом упругие перемещения иглы система управления не учитывает. Эти отклонения могут быть направлены как вдоль оси иглы, так и перпендикулярно ей.

Если микроскоп проводит измерения рельефа поверхности с точностью до 1 нм, то в горизонтальном направлении допустимо отклонение также порядка 1 нм. Требования к точности движения по вертикали существенно выше, так как в процессе измерений игла движется над поверхностью на высоте около 0,5 нм. Ввиду квадратичной зависимости туннельного тока от расстояния отклонение в 0,1 нм приводит к ошибке

в 50 % в измерении высоты рельефа. Такая же чувствительность к изменению высоты имеет место и в операции электрохимического осаждения.

Рассмотрим вопрос о том, какой вклад вносит изменение вектора действия силы тяжести в отклонение иглы.

Пусть отклонение иглы под действием силы тяжести равно $k_b P$, где P — сила тяжести, k_b — коэффициент зависимости перемещения иглы от вертикальной составляющей силы тяжести.

При наклоне оси микроскопа в осях, жестко связанных с иглой, возникает горизонтальная составляющая силы тяжести. В результате перемещение иглы составит

$$\Delta = k_T P \sin \alpha,$$

где α — угол наклона оси; k_T — коэффициент зависимости перемещения иглы от горизонтальной составляющей силы тяжести.

С точностью до членов второго порядка малости $\Delta \approx k_T P \alpha$.

Заметим, что величина $k_T P$ равна перемещению иглы, если микроскоп положить на бок так, чтобы его ось располагалась горизонтально. В этом случае угол $\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$. Можно также мысленно предполагать, что сила тяжести действует на конструкцию микроскопа горизонтально.

Перейдем к расчету перемещений иглы, которые вызываются наклоном оси микроскопа. Сделаем это на примере конструкции микроскопа, разработанной в Наноцентре [3].

Расчет перемещения иглы вдоль оси ОУ. К перемещению конца иглы вдоль оси ОУ приводят (рис. 3):

- 1) прогиб балки 1 под действием веса балок 2, 3, 4 и узла крепления пьезодвигателя 5;
- 2) прогиб балки 2 под действием веса балок 3, 4 и узла 5;
- 3) кручение балки 1 под действием веса балок 3, 4 и узла 5;
- 4) прогиб балки 2 под действием веса узла 5;
- 5) прогиб и кручение балок 3, 4 под действием их веса и веса узла 5.

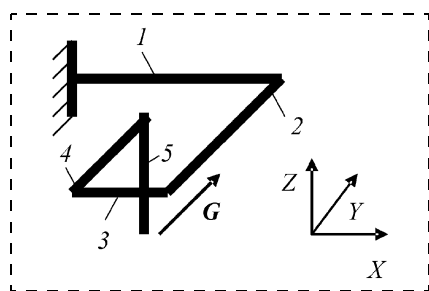


Рис. 3

Наибольший вклад вносят факторы 1—3, так как балки 1 и 2 нагружены большим весом и имеют большую длину. Вклад факторов 4 и 5 примерно в 2 раза меньше. Оценим вклад каждого члена.

1. Балка 1 закреплена консольно. На ее конце располагается балка 2. Поэтому прогиб балки 1 будет не менее $\frac{l^3 P}{3EJ}$, где l —

длина балки 1; P — вес балки 2; E — модуль упругости материала, из которого изготовлены балки; J — осевой момент инерции сечения балки. При подстановке конкретных значений: $l = 5$ см; $P = 0,15$ Н (вес алюминиевого бруска сечением $1 \times 1 \times 5$ см), $E = 0,6 \cdot 10^9$ Па — модуль упругости алюминия, $J = \frac{1}{12}$ см⁴, получим вклад прогиба балки 1 в перемещение иглы 0,125 мкм.

2. Балка 2 нагружена постоянным моментом, который создается весом балок 3, 4 и узла 5.

Прогиб балки 2 приводит к повороту балки 3 вокруг собственной оси. В результате игла смещается вдоль оси OY.

Угол поворота равен $\frac{IM}{EJ}$, где

$M = \frac{IP}{2}$ — момент, создаваемый весом звеньев 3 и 4. С учетом этого смещение иглы окажется равным $\frac{l^3 P}{4EJ}$, т. е. 0,1 мкм.

3. Перемещение конца иглы по вертикали вниз, вызванное кручением балки 1 под действием

силы тяжести звеньев 2, 3, 4, 5, равно произведению угла кручения на расстояние между балками 1 и 5 (4 см).

Угол кручения равен $\frac{IM_{кр}}{GJ_0}$,

где $M_{кр}$ ($\approx 0,2$ Н·см) — момент кручения, равный произведению веса узла 5 (0,075 Н) на расстояние от центра масс узла 5 до плоскости манипулятора (2,5 см); G — коэффициент упругости кручения, который приблизительно равен $\frac{1}{3} E$; J_0 ($\approx 0,1$ д⁴) — осевой момент сечения относительно оси балки. Принимая во внимание, что сторона квадратного сечения балки $d = 1$ см, получим, что $J_0 \approx 0,1$ см.

В результате эта компонента сдвига составит 0,2 мкм. Суммарно факторы 1—3 дают сдвиг не менее 0,4 мкм. Учет факторов 4 и 5 увеличит эту оценку в 1,5 раза, т. е. до 0,6 мкм.

Это значение всего в 1,5 раза меньше прогиба блока манипуляторов в вертикальном направлении. Следовательно, конструкция блока манипуляторов имеет примерно одинаковую чувствительность как к вертикальной, так и к горизонтальной составляющей силы тяжести.

Расчет перемещения иглы вдоль оси OX. Наибольший вклад в перемещения вдоль оси OX вносит изгиб балки 1. В результате образуется угол между балкой 2 и осью OY. Этот угол определяется формулой $\frac{l^2 P}{2EJ}$.

Перемещение иглы равно произведению угла на расстояние между осями иглы и балки 1, равное $l/2$. В итоге перемещение равно $\frac{l^3 P}{4EJ} = 0,1$ мкм.

Как отмечалось выше, пружинный подвес обеспечивает десятикратное уменьшение угла наклона оси микроскопа по сравнению с наклоном корпуса. По-

этому для того, чтобы обеспечить смещение иглы на 1 нм, необходимо отклонить ось корпуса от вертикали на 1°.

Расчет перемещения иглы вдоль оси OZ. Рассмотрим теперь перемещение иглы в вертикальном направлении. Это перемещение происходит в силу кручения первой балки. Формула для вычисления перемещения конца иглы при кручении приведена выше. При вертикальном перемещении плечо поворота составляет половину длины балки (2,5 см), т. е. в 1,5 раза меньше, чем при вычислении смещения вдоль оси OY. В итоге он равен 0,15 мкм (150 нм).

Эта оценка не учитывает кручения 3-го звена и изгиб 2- и 4-го звеньев. Расчеты показывают, что учет этих факторов увеличивает оценку вертикального перемещения до 200 нм. Заметим, что в процессе сканирования игла движется на высоте 0,5 нм, поэтому получившееся вертикальное отклонение иглы является достаточно большим.

Действительно, если отклонить ось измерительного блока микроскопа на 1°, то согласно полученной оценке игла отклонится от вертикали на 3 нм. Пружинный подвес уменьшает отклонение корпуса в 10 раз, поэтому наклон корпуса на 1° приводит к перемещению иглы на 0,3 нм.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что возмущения в вертикальных движениях иглы является существенным при измерениях с субатомным разрешением, т. е. при таких измерениях, в результате которых оказываются видны атомы.

Влияние статической неопределенности на точность движения иглы микроскопа. Причинами возникновения наклонов корпуса микроскопа могут стать мягкость опоры и статическая неопределенность. Статическая неопределенность имеет место, если микроскоп опирается на лабораторный стол четырьмя опорами.

Часто в качестве лабораторного стола используется обыкновенный учебный стол, изготовленный из ДСП. В этом случае не исключен прогиб крышки стола. Аналогичная ситуация имеет место, если для снижения зависимости прибора от колебаний основания его устанавливают на мягкий коврик.

Оценки зависимости перемещений иглы от наклона оси микроскопа позволяют получить допустимые отклонения, которые не приводят к перемещению иглы более чем на 1 нм. Выше было показано, что для этого достаточно, чтобы угол наклона основания не превышал приблизительно 1° .

При расстоянии между опорами микроскопа 150 мм угол наклона основания микроскопа составит 1° , если каждая из ножек отклонится от исходного состояния более, чем на 1,5 мм. Из этого можно сделать вывод, что для микроскопа Наносцентра такое отклонение маловероятно.

Более вероятно изменение наклона крышки лабораторного стола вследствие ее деформации. Для получения угла в 1° достаточно нажать на крышку с силой, обеспечивающей ее прогиб в 10 мм, что при ширине стола в 50 см совсем нетрудно сделать, облокотившись на него или положив толстую пачку книг.

Следует отметить, что все указанные причины носят характер случайных возмущений и могут быть исключены при внимательном проведении эксперимента.

В описываемых ниже экспериментах по проверке зависимости положения иглы от угла наклона оси микроскопа угол наклона основания изменяется целенаправленно. Полученные данные показывают, что для гарантированного выявления зависимости потребуется задавать совсем небольшие наклоны основания — порядка нескольких градусов. Это обстоятельство использовалось при проверке выводов изла-

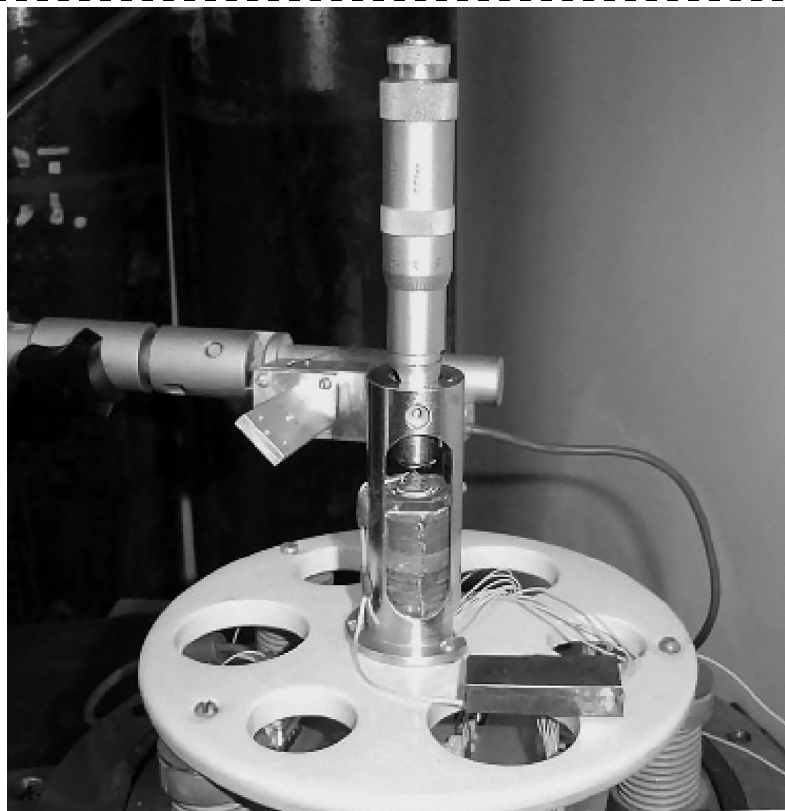


Рис. 4

гаемой теории путем сравнения предсказанных отклонений иглы с измеренными.

Исследование влияния наклона основания на положение иглы туннельного микроскопа НПО "Алмаз"

В настоящее время туннельный микроскоп НПО "АЛМАЗ" находится в стадии наладки. Его конструкция существенно отличается от конструкции туннельного микроскопа Наносцентра.

Этот микроскоп оснащен массивным корпусом и жестким упругим подвесом. Конструкция, которая несет пьезопровод, выполнена в виде цилиндра и не имеет балок. В результате, хотя для туннельного микроскопа НПО "АЛМАЗ" (рис. 4) справедливы те же формулы, которые связывают колебания основания с наклоном измерительного блока (они были выведены для туннельного микроскопа Наносцентра), константы в них различают-

ся на несколько порядков. Это обстоятельство является чрезвычайно интригующим при попытках переноса разработанной теории влияния возмущений на движение иглы.

Кроме того, при жестком подвесе проще проверить основные выводы теории, так как легче создать условия, при которых ось микроскопа отклонится от вертикали.

Конструкция туннельного микроскопа НПО "АЛМАЗ". Микроскоп конструкции НПО "АЛМАЗ" (рис. 5) состоит из массив-

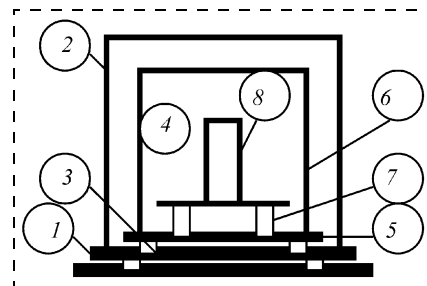


Рис. 5

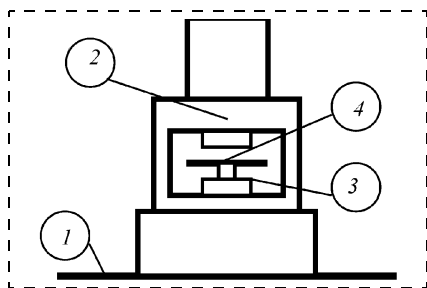


Рис. 6

ного основания 1, кожуха 2, упругого подвеса 3, камеры 4 для проведения экспериментов, которая представляет собой массивное основание 5 и массивный кожух 6, упругого подвеса 7, туннельного микроскопа 8.

Туннельный микроскоп (рис. 6) представляет собой основание 1 с находящимся на нем микрометрическим механизмом 2. В нижней части микрометрического механизма расположены пьезодвигатели горизонтальных перемещений и одной степени вертикального перемещения 3, окно с площадкой для исследовательских образцов 4. В верхней части микрометрического механизма находится крепление иглы микроскопа.

Опускание иглы перед началом работы осуществляется микрометрическим винтом, который располагается в рукоятке.

Основание кожуха имеет диаметр 30 см. Масса основания более 5 кг, масса кожуха — около 15 кг. Они выполнены из коррозионно-стойкой стали.

Резиновый подвес основания микроскопа состоит из трех опор, высотой 7 см и диаметром 5 см. Упругость каждой опоры 10 Н/см.

Основание исследовательской камеры и его кожух также выполнены из коррозионно-стойкой стали. Основание имеет диаметр 20 см и массу 2,5 кг. Масса кожуха 6 кг.

Упругий подвес микроскопа состоит из четырех металлических опор, каждая из которых имеет упругость 2 Н/см.

Основание микроскопа выполнено из пластмассы толщиной 7 мм.

Основание микрометрического устройства имеет высоту 10 см, диаметр 4 см. Длина микрометрической рукоятки составляет 15 см, диаметр — 3 см. Окно для установки образцов имеет высоту 8 см и ширину 3 см. Толщина стенок окна 1 мм, ширина 2 см.

Масса микрометрического устройства приблизительно равна 0,8 кг.

Зависимость положения иглы от наклона основания микроскопа конструкции НПО "АЛМАЗ". Сравнительно жесткий упругий подвес приводит к тому, что наклон оси микроскопа практически равен наклону его основания. Такое свойство подвеса компенсируется жесткостью конструкции измерительной части, которая выполнена не в виде алюминиевых консольных балочек, а имеет замкнутую конструкцию из стали.

Тем не менее, расчеты зависимости перемещения иглы от угла наклона оси микроскопа показывают, что этот микроскоп также имеет высокую чувствительность к наклону оси. Для того чтобы найти эту зависимость, рассмотрим гипотетический случай, когда микроскоп положен набок (рис. 7). Изгибающий момент в точке x , создаваемый весом микрометрической рукоятки P (0,8 Н), равен $(a + l - x)P$, где a (12 см) — расстояние между центром масс рукоятки и ее концом, l (7 см) — высота окна.

Деформация в точке x

$$s(x) = \frac{(a + l - x)P}{EJ},$$

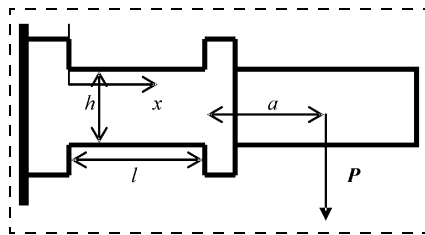


Рис. 7

где E — модуль упругости (для стали $E = 2 \cdot 10^3$ Па); J — осевой момент сечения.

Поперечное сечение представляет собой две стенки (на рис. 7 одна стенка загромождала другую), каждая из которых имеет почти прямоугольное сечение толщиной $b = 0,1$ см и ширину $h = 3$ см. Поэтому $J \approx 2 \frac{h^3 b}{12} = 0,5 \text{ см}^4$.

Угол поворота микрометрического винта вокруг оси (перпендикулярной в плоскости рисунка)

$$\gamma(x) = \int_0^x s(x) dx = \int_0^x \frac{(a + l - x)P}{EJ} dx = \frac{P}{EJ} \left((a + l)x - \frac{x^2}{2} \right).$$

Отклонение оси микроскопа

$$c(x) = \int_0^x \gamma(x) dx = \frac{P}{EJ} \int_0^x \left((a + l)x - \frac{x^2}{2} \right) dx = \frac{P}{EJ} \left((a + l) \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right).$$

Из этих формул следует, что угол наклона оси в конце камеры для установки образцов составит

$$\gamma(l) = \frac{P}{EJ} \left(al + \frac{l^2}{2} \right) = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ рад}.$$

Отклонение оси от вертикали

$$c(l) = \frac{P}{EJ} \left(a \frac{l^2}{2} + \frac{l^3}{3} \right) \approx 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 3,5 \text{ мкм}.$$

На рис. 8 изображена форма, которую примет микроскоп под действием веса рукоятки, если его перевести в горизонтальное положение. Точка O , которая лежала на оси микроскопа, переместится в точку O' ($OO' = c(l)$). Кончик иглы (точка A), который до наклона лежал на оси, переместится в точку A' . Угол наклона

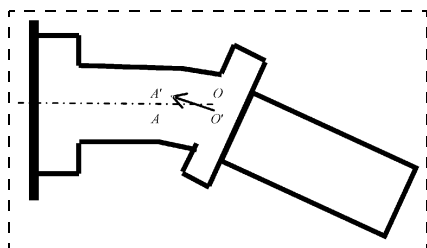


Рис. 8

оси $\gamma(l)$ равен углу между OO' и AA' .

Непосредственно из рис. 8 следует, что отклонение конца иглы от вертикали равно разности отклонения оси OO' и смещения иглы AA' , которое вызывается наклоном оси на угол $\gamma(l)$. Принимая во внимание, что расстояние от точки O до конца иглы (точка A) равно 2 см, получим следующую оценку смещения конца иглы:

$$c(l) = OA \cdot \gamma(l) = 1,9 \text{ мкм.}$$

Напомним, что эта оценка получена в предположении, что микроскоп наклонен набок, т. е. его ось составляет с вертикалью прямой угол $\pi/2$. Следовательно, коэффициент зависимости смещения иглы от наклона корпуса оказывается равным $\frac{1,9 \text{ мкм}}{1,5 \text{ рад}} = 1,3 \cdot 10^3 \text{ нм/рад}$. Из этой оценки следует, что для того, чтобы смещение иглы относительно подложки составило 1 нм, достаточно наклонить ось измерительного блока на угол $1/1300 \text{ рад}$, т. е. примерно на $0,05^\circ$.

Высокая чувствительность микроскопа НПО "АЛМАЗ" к наклону оси требует достаточно точной установки основания, так как упругий подвес является сравнительно жестким и слабо демпфирует возмущения.

Микроскоп стоит на резино-вом коврикe на четырех опорах, расстояние между которыми приблизительно равно 30 см. Для того чтобы наклон оси основания не превосходил $0,05^\circ$, опоры должны быть выставлены таким обра-

зом, чтобы люфт в них, связанный со статической неопределенностью, не превышал половины произведения расстояния между опорами на допустимый угол наклона оси, т. е. 0,1 мм.

Для того чтобы обеспечить заявленную точность измерений 0,1 нм, наклон оси микроскопа не должен быть больше $0,01^\circ$. Следовательно, прогибы резино-вого коврикa в точках опоры, возникающие в результате воз-действий на микроскоп внешних возмущений, не должны превышать 0,01 мм.

Экспериментальная проверка зависимости положения иглы от наклона оси микроскопа. Проверка зависимости отклонений иглы от наклона оси измерительного блока осуществлялась в эксперименте по измерению сдвига изображений рельефа поверхности при наклоне его оси на известный угол. Наклон задавался путем установки гирьки на плоскость измерительного блока.

Расчеты показывают, что установка гирьки массой 20 г приводит к наклону оси микроскопа на $0,12 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$ ($0,08^\circ$).

На рис. 9 показаны изменения изображения рельефа поверхности при установке и снятии гирьки. Часть рисунка до линии 1 соответствует изображению, снятому до установки гирьки, до линии 2 — после установки, после линии 3 — после снятия. Из рисунка следует, что наклон оси привел к смещению изображения на 2 нм. С учетом того, что наклон оси составил $0,12 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$, коэффициент зависимости между

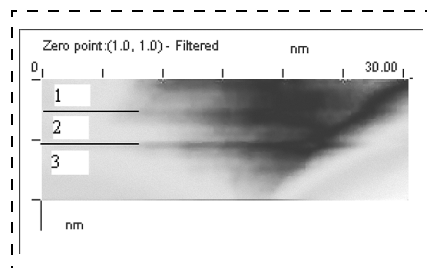


Рис. 9

смещением и углом оказывается равным $1,6 \cdot 10^3 \text{ м/рад}$. Отметим хорошее соответствие между измеренным и вычисленным коэффициентом зависимости, так как разница между ними не превышает 30 %.

Выводы и рекомендации

В работе выполнено аналитическое исследование зависимости перемещения иглы от наклона оси для туннельных микроскопов различных конструкций. Следует отметить, что в рассмотренных приборах технические решения, направленные на снижение влияния внешних механических возмущений, различны и в некотором смысле диаметрально противоположны. Результаты выполненного исследования позволяют сделать следующие выводы:

- эксперименты подтвердили, что принятые модели достаточно хорошо объясняют наличие зависимости смещения иглы от наклона основания;
- целесообразно увеличивать жесткость конструкции, соединяющей площадку для исследовательских образцов и иглу. В обоих микроскопах зависимость положения иглы от наклона корпуса связана с недостаточной жесткостью измерительного блока.

Список литературы

1. Карташев В. А., Бурухина Т. Ф. Исследование влияния нерезонансных периодических возмущений на положение иглы туннельного микроскопа. Препринт ИПМ РАН. М.: ИПМ РАН, 2004.
2. Карташев В. А., Бурухина Т. Ф. Влияние нерезонансных периодических возмущений на положение иглы туннельного микроскопа // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 8. С. 31—38.
3. Kartashev V., Kotenkov A., Kuzkin V., Stepanov M. Problems of Probe Tunnel Microscope Controlling // Rep. on Int. Workshop on Micro Robot, Micro Machines and Micro Sistems. Moscow, IARP, 2003. P. 331—334.

УДК 621.38

Э. Ю. Бучин, канд. физ.-мат. наук,
Ю. И. Денисенко, канд. техн. наук,
Институт микроэлектроники и информатики РАН,
г. Ярославль
e-mail: imi.buchin@rambler.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОМИГРАЦИИ В ТЕХНОЛОГИИ МЭМС

Представлены технические решения по использованию процессов термомиграции в технологии изготовления изделий микросистемной техники. Рассматриваются примеры объемной обработки кремния, формирования изолирующих p — n переходов, сквозной электрической коммутации и монолитного соединения элементов.

Введение

Суть процесса термомиграции (ТМ) заключается в последовательном растворении и перекристаллизации частей твердого тела расплавленной зоной, движущейся под действием приложенного градиента температуры. Вдоль траектории движения зоны происходит легирование перекристаллизованных областей и одновременно глубокая их очистка от структурных дефектов. В научной литературе применительно к данному процессу используются также термины "зонное проплавление" и "зонная перекристаллизация градиентом температуры".

Метод ТМ позволяет направленно перемещать зоны нужного состава со скоростью, превышающей на 3—5 порядков скорость переноса атомов в процессах твердотельной диффузии, что дает возможность быстро и с низкими издержками формировать обширные легированные области различной формы. В полупроводниковой промышленности метод ТМ используется для создания толстых эпитаксиальных слоев, изготовления варизонных структур, формирования вертикальных p — n переходов, выращивания кристаллов с низкой плотностью дислокаций и др. Метод имеет большой прикладной потенциал применительно к микротехнологиям, и область его применения постоянно расширяется.

Целью настоящей статьи является аналитический обзор технических решений по использованию процессов ТМ в технологии изделий микросистемной техники. Рассматриваются примеры селектив-

ного легирования кремния с последующим химическим травлением, формирования изолирующих p — n -переходов, сквозной электрической коммутации и монолитного соединения элементов.

Физические основы метода термомиграции

Теоретические основы метода, закономерности и режимы процессов ТМ наиболее полно изложены в научной монографии [1], обзоре [2] и работе [3]. Здесь представлены только отдельные его положения, необходимые для изложения статьи. Для примера рассмотрим миграцию локальной алюминиевой зоны в кремнии n -типа, стадии этого процесса схематично показаны на рис. 1.

На поверхности кремниевой пластины стандартными методами формируют алюминиевую площадку 1, затем пластину помещают в рабочую камеру лицевой стороной на охлаждающее устройство. Тыльную ее сторону облучают ИК лампами, за счет чего в образце возникает осевой градиент температуры ∇T . При нагреве в инертной среде выше температуры эвтектики происходит сплавление алюминия и образование жидкой зоны 2. В условиях стационарного теплового режима и достаточно высокого значения градиента температуры расплавленная алюмо-кремниевая зона 3 начинает равномерно двигаться по направлению к нагреваемой поверхности пластины. В диапазоне 1100—1300 °С и при значениях градиента температур 30—100 °С/см скорость миграции может достигать десятков микрометров в минуту. При длительной обработке зона проходит сквозь всю кремниевую пластину, оставляя за собой перекристаллизованный легированный канал 4. Алюминий в кремнии является акцепторной примесью, поэтому в подложке n -типа вдоль траектории движения зоны образуется протяженная перекомпенсированная p^+ -область.

Для того чтобы понять внутренний механизм процесса, рассмотрим рис. 2. На нем представлена

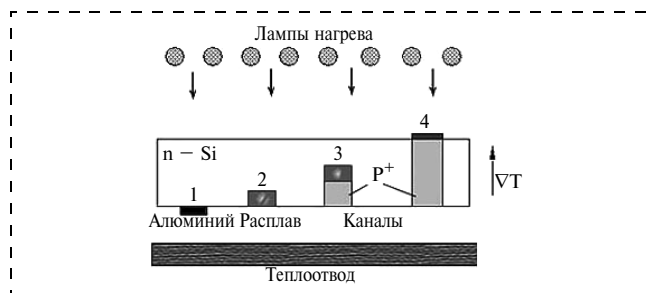


Рис. 1. Стадии процесса термомиграции в кремнии локальной алюминиевой зоны под действием наведенного градиента температуры

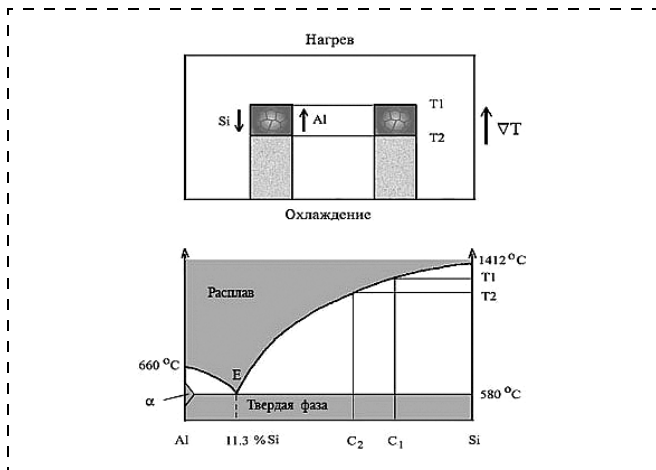


Рис. 2. Схема процесса термомиграции и фазовая диаграмма бинарной системы кремний—алюминий

фазовая диаграмма бинарной системы кремний—алюминий, включающая верхнее поле расплава, нижнее поле твердых фаз и поле кристаллизации, расположенное между ними. Кривая ликвидуса имеет два максимума, соответствующих температурам плавления чистых алюминия (660 °C) и кремния (1412 °C), и минимум, отвечающий эвтектической точке *E* (580 °C). В этой точке линии ликвидуса и солидуса соприкасаются, разделяя поле кристаллизации на две части. В левой его части присутствует небольшая область образования твердых растворов кремния в алюминии (α -фаза), в правой части поля область образования твердых растворов отсутствует. Левее точки *E* при охлаждении расплавов кристаллизуются твердые растворы с высоким (более 96 %) содержанием алюминия. Правее точки *E* при охлаждении расплавов кристаллизуется только кремний до тех пор, пока состав расплава не приблизится к эвтектическому. В точке *E* при охлаждении расплава образуется механическая смесь кристаллитов α -фазы и кремния. Процессу термомиграции соответствует правая часть диаграммы.

Фронт расплавленной зоны имеет более высокую температуру (T_1) по сравнению с тыльной ее стороной (T_2). Исходя из диаграммы состояния системы этим температурам соответствуют две различные равновесные концентрации кремния в расплаве, причем $C_1 > C_2$. Следовательно, в жидкой зоне имеет место концентрационный градиент, в результате чего возникает диффузионный перенос атомов кремния от горячей границы. На тыльной стороне зоны переносимый кремний пересыщает расплав и выкристаллизовывается, а на переднем горячем фронте зоны концентрация C_1 поддерживается за счет растворения новых порций кремния. В стационарном тепловом режиме скорости рас-

творения, диффузионного переноса атомов кремния и кристаллизации согласованы между собой, кинетика этих процессов определяет скорость перемещения расплава в направлении градиента температуры. Алюминий в мигрирующей расплавленной зоне выступает в качестве металла-растворителя и практически мало расходуется при ее движении, поэтому перекристаллизованные области большой протяженности могут быть получены при использовании зон толщиной всего лишь в несколько микрометров. Некоторая часть атомов алюминия (порядка 0,01 доли атомного %) все же встраивается в решетку кремния, и данный уровень легирования ($2 \cdot 10^{19}$ ат/см³) оказывается вполне достаточным для изменения его типа проводимости. Таким образом, с помощью процесса ТМ можно создать глубокий (или сквозной) легированный канал с высокой электропроводностью или сформировать резкий вертикальный *p*—*n*-переход. В качестве примера на рис. 3 представлено реальное изображение ТМ канала глубиной 300 мкм, полученное после обработки в селективном травителе [4].

Скорость и характер движения жидкой зоны зависят от многих факторов: природы металла-растворителя, конфигурации зоны, температурного режима и др. Процесс ТМ применим для широкого класса полупроводниковых материалов, при этом состав зоны может быть не только двух-, но и многокомпонентным. Различают процессы ТМ на основе точечных, линейных и плоских зон, причем последние могут быть как локальными, так и протяженными. Форма поперечного сечения канала, образующегося при миграции локальных зон (круг, квадрат, треугольник), задается на стадии нанесения металлической площадки, глубина канала определяется временем проведения процесса ТМ. По имеющимся литературным данным, наименьшие размеры зон, при которых еще соблюдается их траекторная устойчивость в ходе миграции, составляют порядка 10—20 мкм.

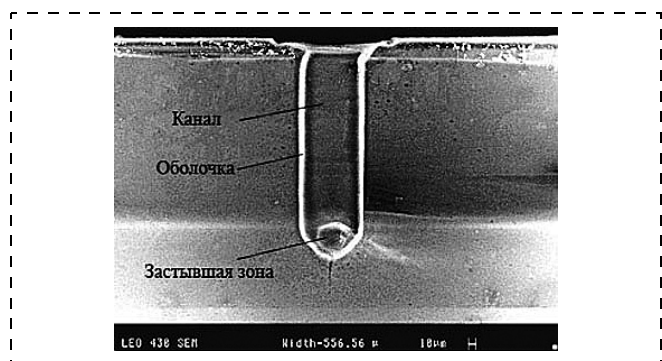


Рис. 3. Электронный снимок продольного сечения ТМ канала

Объемная обработка кремния

Сформированные в процессе ТМ легированные области (каналы) по своим физико-химическим свойствам отличаются от исходной кремниевой подложки. Это позволяет с помощью селективного травления проводить объемную обработку кремния, формировать полости, выступы и другие конструктивные элементы микромеханических структур. Рассмотрим конкретные примеры.

В работе [5] предложен способ формирования сквозных отверстий различной формы в кремниевых подложках большой толщины, т. е. в тех случаях, когда не может быть использован процесс глубокого анизотропного плазмохимического травления. Для избирательного удаления p^+ -областей, сформированных в процессе ТМ алюминиевых локальных зон, использовался метод анодного травления кремния с последующей обработкой в растворе щелочи (рис. 4). Скорость травления составляла 10 мкм/мин, при этом образовывались пустотелые каналы с вертикальными стенками и аспектным соотношением размеров свыше 30.

Разработчики фирмы Standard MEMS (США) предложили способ одновременного формирования в кремнии микрополостей различной глубины [6]. Его особенностью является то, что металлические площадки, формируемые на поверхности кремния, различаются между собой толщиной и типом зонообразующего материала (Al, Pt, Ni и др.). Оба эти параметра существенно влияют на скорость ТМ, в результате чего при одном и том же времени термообработки локальные жидкие зоны мигрируют на различную глубину (рис. 5). Селективное удаление легированных областей осуществляют методом жидкостного химического или плазмохимического травления. При химической обработке кремния для мягкого, полирующего травления p^+ -областей используется смесь кислот $\text{HF-HNO}_3\text{-CH}_3\text{COOH}$. Скорость травления зависит от соотношения между компонентами, времени подготовки и температуры травителя, а также от уровня легирования p^+ -областей. Указанным ме-

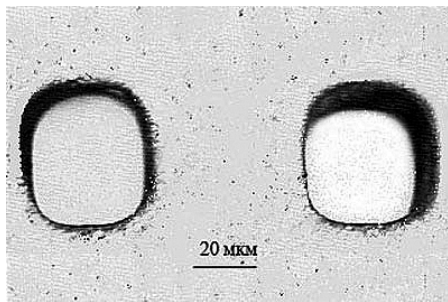


Рис. 4. Микрофотография сквозных отверстий овальной формы, сформированных в кремниевой подложке

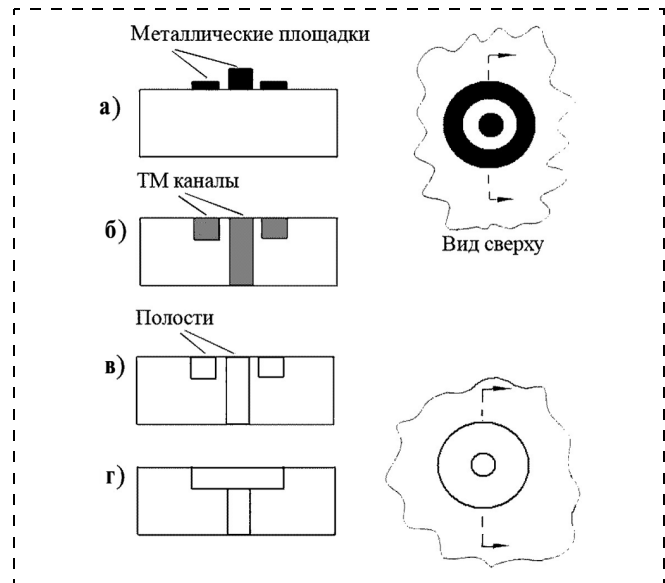


Рис. 5. Схема процесса изготовления микроструктур, содержащих полости различной формы

тодом могут быть сформированы структуры, содержащие центральное сквозное отверстие и коаксиальные полости (рис. 5, в). Перегородки между полостями при необходимости могут быть исключены за счет дополнительной операции плазмохимического травления (рис. 5, г).

Неоднородности кристаллической структуры по периметру ТМ каналов позволяют также избирательно травить материал подложки вокруг легированных областей. Таким способом могут быть сформированы микровыступы различной формы. В патенте [7], например, предлагается технология изготовления микроигл. Она основывается на том, что скорость движения плоских локальных Al-Si зон лимитируется стадией перекристаллизации, в результате чего на переднем фронте зоны при ее миграции в кремнии с ориентацией (100) появляется пирамидальная огранка (рис. 6). Последующее удаление материала подложки предлагается проводить в два этапа: сначала механической полировкой до уровня вершин ограненных каналов, затем методом химического ориентационного травления в смеси водных растворов этилендиамина (окислителя) и пирокатехина (комплексобразователь для SiO^{+3}). Легированные каналы при этом не травятся, в результате чего и образуется матрица, содержащая ограненные микроиглы. Такие игольчатые структуры могут использоваться в различных технических приложениях в качестве эмиттеров или зондов.

В работе [8] на основе ТМ каналов предлагается способ изготовления игольчатой матрицы (10×10), встраиваемой в кору головного мозга для стимуляции нервных окончаний зрительного центра у слепых (рис. 7). Поскольку для эффективного функ-

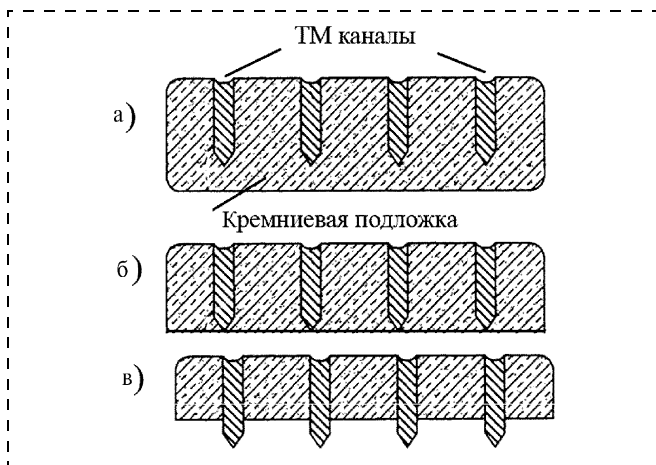


Рис. 6. Схема процесса изготовления игольчатых микроструктур

ционирования матрицы длина игл должна быть более 1,5 мм, технология их формирования несколько отличается от описанной выше. В кремниевой подложке *n*-типа толщиной более 1,5 мм методом ТМ локальных Al зон формировали систему сквозных легированных каналов одинаковой формы. Затем кремниевый чип разделяли на элементы путем резки алмазным диском с толщиной, равной расстоянию между иглами, и глубиной реза, примерно равной длине иглы. Травление полученных кремниевых столбиков с размерами поперечного сечения $0,1 \times 0,1$ мм проводилось в изотропном травителе из смеси кислот HF-HNO_3 с объемным соотношением 5:95, причем в две стадии. На первой стадии (динамического травления при интенсивном перемешивании) со столбиков удалялась основная часть кремния, нарушенного в результате резки, округлялись их края и уменьшались диаметры. На второй стадии (статического травления) выполняли химическую "заточку" игл. В результате обработки конечный объем заточенной иглы составлял 30 % от объема исходного столбика. Кон-

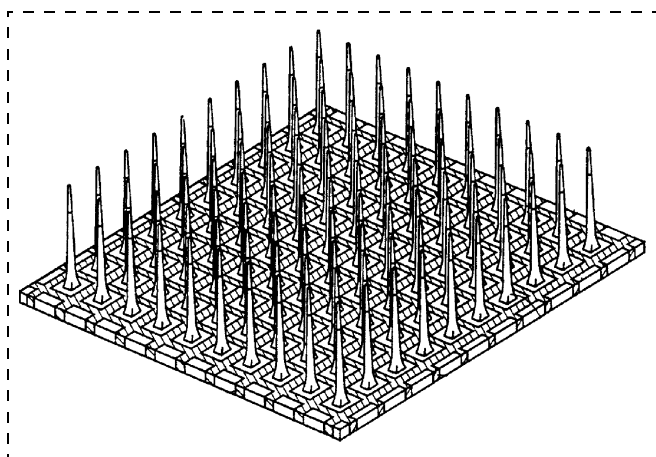


Рис. 7. Кремниевый чип микроигольчатой матрицы

цы игл, предназначенные для инъекции электрических микроразрядов, покрывали слоем Pt, а электрическая разводка осуществлялась с обратной стороны чипа.

Изоляция *p-n*-переходами

Формируемые с помощью ТМ процесса *p-n*-переходы характеризуются высокими пробивными напряжениями и низкими токами утечки и могут использоваться для надежной электрической изоляции в МЭМС структурах.

На рис. 8 показан вид сверху электростатического микроактюатора, достоинством которого является простота конструкции и устойчивость к воздействию внешних электромагнитных полей. Данное устройство изготавливается из монокристаллического кремния методом сквозного анизотропного плазмохимического травления. При подаче переменного напряжения на ротор и статор в каждой элементарной ячейке такой конструкции гребенчатого типа инициируется движущая сила $F \sim CU^2/g$, при равновесии (по закону Гука) равная Kx , где x — перемещение подвижного электрода, K — коэффициент упругости кремния, C — емкость ячейки, g — зазор между электродами, U — напряжение.

В таких структурах необходимо создать надежную изоляцию между электродами. Стандартные методы (использование вспомогательной КНИ подложки-держателя, изоляция канавками, заполненными диэлектриком и др.) трудоемки и не всегда обеспечивают необходимую механическую прочность конструкции. Поэтому способ электрической изоляции с помощью термомиграционных *p-n*-переходов, предложенный в [9, 10], является удачным техническим решением. Для этого в исходной кремниевой подложке *n*-типа проводимости посредством сквозной миграции алюминиевой линейной зоны формируют протяженную область *p*-типа шириной 100 мкм. Электрическая изоляция

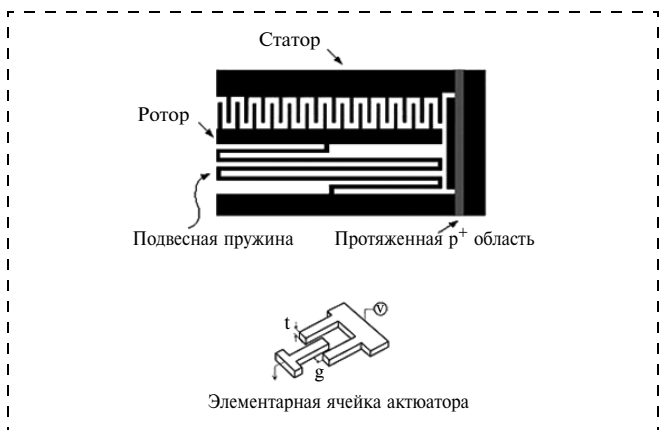


Рис. 8. Монолитная конструкция электростатического микроактюатора

между ротором и статором может осуществляться либо одним встречно включенным $p-n$ -переходом, как это показано на рисунке, либо несколькими параллельными переходами. Напряжение пробоя каждого из них составляет 110 В (при $U > 0$) и 170 В (при $U < 0$) соответственно, при этом смещение x в предпробойных условиях достигает 10 мкм.

Сквозная электрическая коммутация

Легированные термомиграционные каналы имеют относительно низкое удельное сопротивление (на уровне $8 \cdot 10^{-3}$ Ом·см) и могут быть использованы для осуществления сквозной вертикальной коммутации в технологии МЭМС. В работе [11] предложена конструкция двухкристального модуля, в котором дискретный чип с сенсором с помощью ТМ каналов посредством шариковых выводов соединен с чипом обрабатывающей схемы процессора (рис. 9).

Однако при данном конструктивном подходе узким местом являются высокие электрические потери в вертикальных межсоединениях как вследствие активного сопротивления самих каналов, так и за счет большой емкости (относительно подложки) окружающего канал $p-n$ -перехода. Удельное сопротивление перекристаллизованных областей можно снизить, если процесс ТМ проводить в нестационарных тепловых условиях [12]. Относительно простым решением указанных проблем является уменьшение длины каналов либо за счет использования более тонкой исходной кремниевой подложки, либо за счет локальной выборки ее материала, как это предлагается в патенте [13]. На рис. 10 представлена конструкция датчика давления емкостного типа, в котором на обратной стороне основания корпуса предусмотрены пирамидальные выемки, сформированные методом ориентационного анизотропного травления. Алюминий для термомиграции осаждали на дно данных выемок, а после проведения процесса их стенки дополнительно легировали бором для обеспечения электрической изоляции подводящего контакта от подложки.

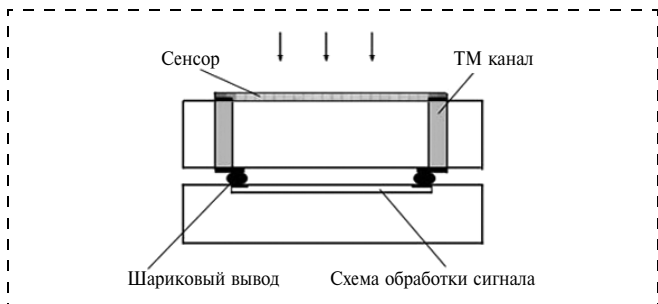


Рис. 9. Конструкция двухкристального модуля, интегрированного посредством термомиграционных каналов

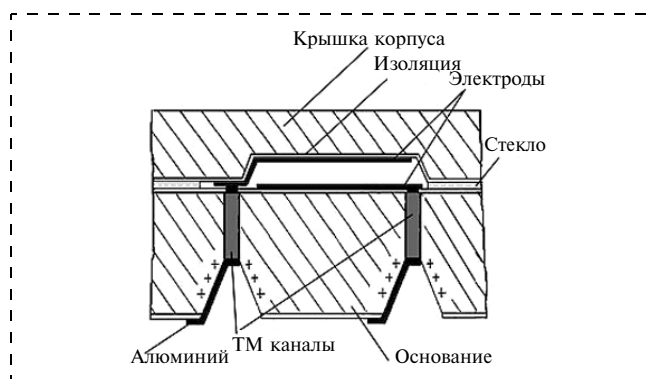


Рис. 10. Конструкция кремниевого датчика давления с укороченными каналами связи

Монолитное соединение элементов корпусов

Известно, что если процесс ТМ расплавленных металлических зон проводить через две плотно соприкасающиеся кремниевые пластины, то в местах образования перекристаллизованных областей происходит монолитное их сращивание. При этом место соединения имеет высокие прочностные характеристики — на уровне исходного монокристаллического кремния. В патенте [14] данный подход предлагается использовать при сборке датчика давления емкостного типа. Здесь процесс ТМ применяется дважды: на предварительном этапе для создания внешних выводов от схемы обработки сигнала (в верхней крышке корпуса) и на заключительном этапе для соединения крышки и основания (рис. 11). Перекристаллизованная область в форме рамки создавала электрический контакт к нижнему электроду конденсатора внутри корпуса и одновременно обеспечивала абсолютную герметичность узла.

Преимуществами рассматриваемого технического решения являются отсутствие спаев из разнородных элементов, хорошие механические свойства сборки и ее химическая стойкость к агрессивным средам. Определенной проблемой здесь является высокая температура герметизации, от которой при "сращивании" крышки и основания может

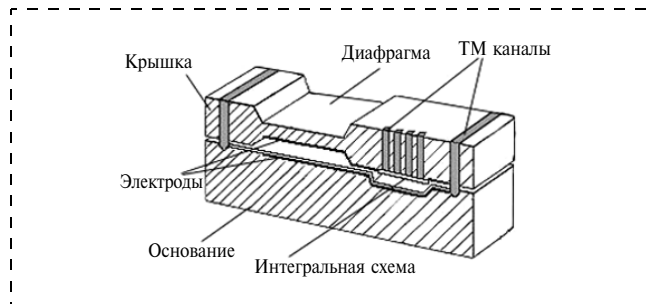


Рис. 11. Монолитная конструкция кремниевого датчика давления

пострадать уже сформированная активная часть прибора. В этом случае температуру процесса ТМ необходимо снизить, этого можно достичь, например, за счет его электростимуляции [15] или фотоиндуцирования с помощью CO_2 -лазера [2].

Заключение

Приведенные в обзоре технические решения дают общее представление о возможных приложениях метода термомиграции применительно к технологии МЭМС. В статье отражены только характерные примеры, иллюстрирующие основные направления практического использования метода ТМ в данной области. Общее число патентов и публикаций по рассматриваемой тематике составляет более трех десятков. Применение метода термомиграции во многих случаях позволяет упростить процесс изготовления изделий микросистемной техники и дает возможность реализовать новые конструктивные подходы.

Список литературы

1. Лозовский В. Н., Лукин Л. С., Попов В. П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1987. 233 с.
2. Рудаков В. И., Коледов Л. А. Термомиграция и ее применение в полупроводниковой электронике // Зарубежная электронная техника. М.: ЦНИИ "Электроника". 1993. № 3—4. С. 27—60, № 5—6. С. 25—40.
3. Лозовский В. Н., Лозовский С. В., Трушин С. А. Процессы самоорганизации при зонной перекристаллизации градиентом температуры // Изв. вузов Северо-Кавказского региона, Технические науки. 2004. Спецвыпуск. С. 21—25.
4. Бучин Э. Ю., Денисенко Ю. И., Симакин С. Г. Структура термомиграционных каналов в кремнии // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 5. С. 70—75.
5. Бучин Э. Ю., Денисенко Ю. И., Рудаков В. И. Формирование сквозных отверстий в кремниевой подложке // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 24. С. 75—79.
6. Заявка РСТ WO 01/32554 A2, опубликована 02.11.2000.
7. Патент США 5528080, опубликован 18.06.1996.
8. Campbell P. K., Jones K. E., Huber R. J., Horch K. W., Normann R. A. A silicon-based, three-dimensional neural interface: manufacturing processes for an intracortical electrode array // IEEE Trans. on Biomed. Engineering. 1991. V. 38(8). P. 758—768.
9. Патент США 6809392, опубликован 26.10.2004.
10. Chung C. C., and Allen M. A. Junction isolation of bulk silicon MEMS devices via thermomigration // Proceed. IEEE 13th Ann. Intern. Conf. on MEMS. Miyazaki, Japan, January 23—27. 2000. P. 153—157.
11. Gourdeas L., James D. A., Jhiel D. V., See Le L. Silicon sensor integration to form smart sensors // Proceed. SPIE. 2002. V. 4935. P. 378—385.
12. Лозовский В. Н., Князев С. Ю., Нефедов А. С. Применение метода зонной перекристаллизации градиентом температуры для получения высоколегированных слоев кремния // Изв. вузов Северо-Кавказского региона, Технические науки. 1998. № 2. С. 58—63.
13. Патент США 4773972, опубликован 27.09.1988.
14. Патент США 4625561, опубликован 02.12.1986.
15. Патент России SU 1088417, опубликован 27.08.1996.

УДК 537.533.2

А. М. Ламанов, Р. М. Ибрагимов,
К. Н. Никольский, канд. физ.-мат. наук,
А. Н. Редькин, канд. хим. наук,
Р. Г. Чёсов, канд. физ.-мат. наук,
Е. П. Шешин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Московский физико-технический институт
nkn@lafeet.mipt.ru

АВТОЭМИССИОННЫЕ КАТОДЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ МЕТОДОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ПАРОВ ЭТАНОЛА

Приведены результаты исследований эмиссионных свойств образцов автоэмиссионных катодов, полученных с помощью технологии низкотемпературного (при температуре 500 °С) газофазного осаждения из паров этанола. Образцы катодов отличаются друг от друга геометрией осаждаемых слоев нанотрубок на подложку: со сплошным покрытием, покрытием островками, различного диаметра.

Введение

Процесс газофазного осаждения является одним из наиболее эффективных методов для изготовления плоских автоэмиссионных катодов (АЭК). Данный метод позволяет получать различные углеродные структуры на катодной подложке. В зависимости от условий нанесения получаемое углеродное покрытие может представлять собой алмазоподобные пленки [1], аморфный графит [2], различные углеродные образования, в том числе и углеродные нанотрубки [3]. Результаты исследований автоэмиссионных свойств полученных АЭК показали перспективность данного метода при разработке технологии изготовления плоских дисплеев [4].

Однако основным недостатком методов газофазного осаждения является относительно высокая температура подложки. Для получения равномерного слоя нанотрубок необходимо поддерживать температуру поверхности подложки около 700 °С. Такой температурный режим не совместим со стандартным вакуумным стеклом, которое является наиболее привлекательным материалом для использования в промышленном производстве. Поэтому одной из задач разработки эффективных плоских автоэмиссионных катодов является создание низкотемпературных методов синтеза.

В работе [5] путем введения дополнительного слоя CaF_2 между слоем катализатора Ni и подложкой удалось снизить температуру процесса до 450 °С, а при температуре подложки 520 °С был синтезирован равномерный слой углеродных нанотрубок.

Однако дальнейшие исследования показали, что изготовленные таким способом катоды сильно деградировали во время работы в условиях технического вакуума. Таким образом, исследования в данном направлении остаются актуальными до сих пор.

Цель работы заключается в получении автоэмиссионных катодов с помощью метода низкотемпературного газозафазного осаждения из паров этанола при температуре поверхности подложки ниже 500 °С. В статье обобщены результаты исследований автоэмиссионных свойств полученных образцов АЭК.

Экспериментальные образцы

Для изготовления образцов использовался метод низкотемпературного газозафазного осаждения из паров этанола. Селективное осаждение углеродных нанотрубок при пониженной температуре подложки происходило за счет пиролиза паров этанола. Нагрев подложек и пиролиз паров реагента осуществлялся за счет тепла графитового нагревателя, помещенного внутри реакционного пространства. Температура нагревателя варьировалась в пределах 1300–2200 °С. Температура подложек составляла около 500 °С. Подробное описание методики приведено в работе [6].

Подложка представляла собой обычное стекло толщиной 2 мм с напыленным слоем алюминия. В качестве катализатора использовался никель. Для оптимизации топографии поверхности АЭК изготавливались три типа образцов, отличающихся распределением катализатора на подложке. В образце первого типа слой катализатора представлял собой равномерно напыленный слой никеля. В образцах второго и третьего типов напыление катализатора выполнялось через маску с отверстиями диаметром 1 мм и 50 мкм. Расстояние между отверстиями равнялось двойному диаметру островка. Общая площадь каждого образца АЭК составляла порядка 0,5 см².

Эмиссионные испытания

Изготовленные катодные образцы испытывались в диодных конструкциях. В качестве анода использовалась стеклянная пластина с нанесенным на нее проводящим слоем ИТО. Расстояние между катодом и анодом, задаваемое с помощью стеклянных спейсеров, составляло 200 мкм. Давление остаточных газов в вакуумной камере во время проведения экспериментов было менее $3 \cdot 10^{-7}$ Тор ($4 \cdot 10^{-9}$ Па).

Для изучения эмиссионных свойств катодов использовался измерительный стенд, принципиальная схема которого приведена на рис. 1. Измерительный стенд состоял из управляющего компьютера, цифроаналогового преобразователя (ЦАП),

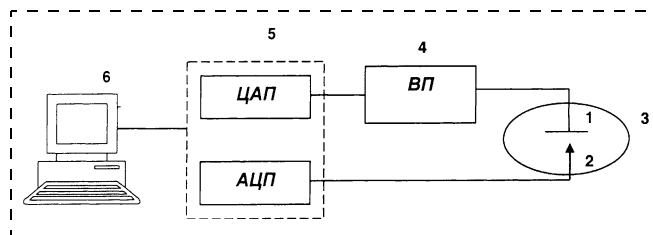


Рис. 1. Схема измерительного стенда:

1 — анод; 2 — катод; 3 — вакуумная камера; 4 — высоковольтный источник питания; 5 — цифроаналоговый и аналого-цифровой преобразователи; 6 — управляющий компьютер

аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и высоковольтного источника питания. Данная система позволяет проводить измерения эмиссионного тока в пределах 0...1 мА с шагом 0,3 мкА, а напряжения — 0...10 кВ с шагом 2,3 В. При этом погрешность измерений не превышает 1 %.

При первом включении каждого катода измерялась вольт-амперная характеристика и определялись оптимальные значения эмиссионного тока изготовленных АЭК. Под оптимальным током здесь имеется в виду максимальное значение тока, при котором не происходит значительной деградации катода. Проведенные измерения позволили определить, что это значение составляет 50 мкА.

Долговременные испытания проводили для каждого из катодов в течение 10 ч при фиксированном значении тока 50 мкА. Испытания заключались в стабилизации значения тока автоэмиссии, с помощью высоковольтного источника питания. В процессе исследований осуществлялось ежесекундное измерение напряжения, подаваемого на прибор, и протекающего тока. Для определения динамики изменения параметров (эффективная площадь, форм-фактор и др.) АЭК в ходе десятичасовых испытаний измерялись серии из трех вольт-амперных характеристик с интервалом 10 мин.

Результаты исследований

Вольт-амперные характеристики исследуемых образцов в начале и после 10 ч долговременных испытаний представлены на рис. 2 и 3 соответственно. На рис. 2 видно, что наименьшим значением напряжения включения 650 В (при котором достигается ток 1 мкА), обладает образец с островками нанотрубок диаметром 50 мкм. На образцах АЭК второго типа и напряжение включения свыше 1100 В. Такая разница напряжений включения является следствием различных значений форм-фактора исследуемых катодов (табл. 1).

Значения форм-факторов в начале и по завершению долговременных измерений вычислялись из уравнения Фаулера—Нордгейма, с учетом того, что работа выхода катодов равна 4,7 эВ. Большое значение форм-фактора катода третьего типа мож-

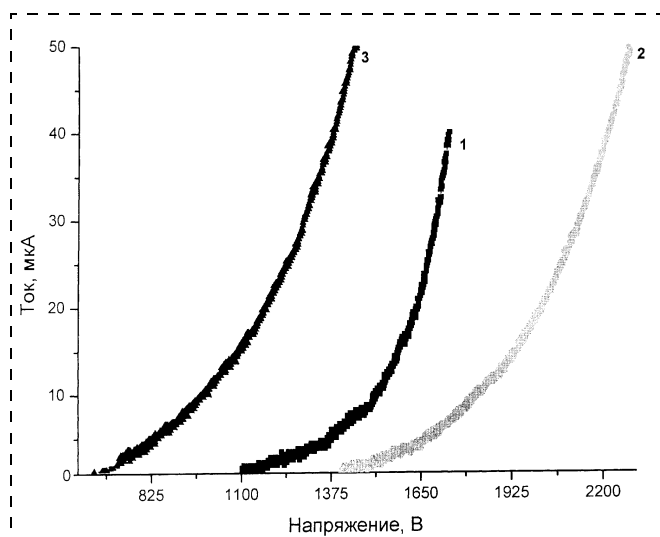


Рис. 2. Сравнение вольт-амперных характеристик образцов в начале долговременных испытаний:

1 — образец со сплошным слоем нанотрубок; 2 — образец с островками нанотрубок диаметром 1 мм; 3 — образец с островками нанотрубок диаметром 50 мкм

Таблица 1

Форм-факторы образцов

Название образца	β , $1/\text{\AA}$, в начале долговременных испытаний	β , $1/\text{\AA}$, через 10 ч долговременных испытаний
Образец с равномерным слоем нанотрубок	1×10^{-3}	$5,3 \times 10^{-4}$
Образец с островками нанотрубок диаметром 1 мм	6×10^{-4}	$8,5 \times 10^{-4}$
Образец с островками нанотрубок диаметром 50 мкм	$2,2 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-3}$

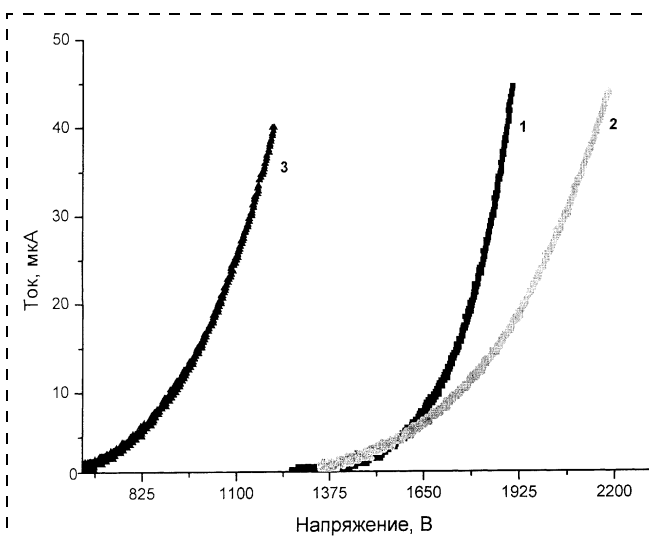


Рис. 3. Сравнение вольт-амперных характеристик образцов через 10 ч долговременных испытаний:

1 — образец со сплошным слоем нанотрубок; 2 — образец с островками нанотрубок диаметром 1 мм; 3 — образец с островками нанотрубок диаметром 50 мкм

Таблица 2

Плотность тока образцов

Название образца	Площадь поверхности катодов, покрытая нанотрубками, см^2	Плотность тока $\text{мкА}/\text{см}^2$ при 50 мкА
Образец с равномерным слоем нанотрубок	0,52	96
Образец с островками нанотрубок диаметром 1 мм	0,31	162
Образец с островками нанотрубок диаметром 50 мкм	0,27	186

но объяснить более оптимальной топографией поверхности. Созданная структура позволяет получать дополнительное усиление электрического поля на краях островков.

На рис. 4 представлен график зависимости напряжения от времени для каждого из образцов. Разброс значения напряжений для образцов первого типа составлял 18 %, второго типа — 15 %, третьего — 8 %. По графику наработки четко отслеживается деградация образца с островками нанотрубок диаметром 50 мкм, в то же время явного изменения эмиссионных свойств остальных образцов не наблюдается.

Кроме того, были вычислены значения плотности токов, отбираемых с эмитирующих покрытий исследованных АЭК при токе 50 мкА. При расчете плотности тока учитывалось, что эмиссия происходит только с участков, покрытых нанотрубками. В табл. 2 приведены вычисленные значения. Из этой таблицы видно, что с образца третьего типа собирается максимальная плотность тока. Деградация АЭК с островками нанотрубок диаметром

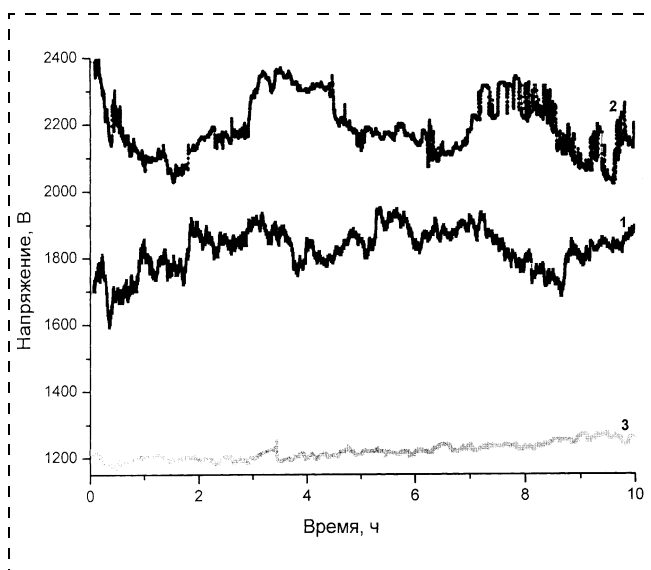


Рис. 4. Зависимость напряжения от времени:

1 — образец со сплошным слоем нанотрубок; 2 — образец с островками нанотрубок диаметром 1 мм; 3 — образец с островками нанотрубок диаметром 50 мкм

50 мкм объясняется большей токовой нагрузкой на эмитирующие центры.

Заключение

Проведенные эксперименты показали возможность синтеза углеродных нанотрубок методом низкотемпературного (температура подложки 500 °С) газофазного осаждения из паров этанола. Были изготовлены образцы автоэмиссионных катодов, отличающиеся различным распределением катализатора на поверхности подложки.

Исследования эмиссионных свойств показали, что наилучшими характеристиками обладают катоды с катализатором, нанесенным островками диаметром 50 мкм.

Результаты исследования стабильности катодов выявили, что при плотности тока, отбираемого с катода, не превышающей 80 мкА/см², исследуемые АЭК подвержены незначительным изменениям эмиссионных свойств.

Список литературы

1. Li J. J., Gu C. Z., Peng H. Y., Wu H. H., Jin Z. S. Field emission properties of diamond-like carbon films annealed at different temperatures // The 5th IVESC conference, 2004. P. 253.
2. Xinyue Zhang, Zhanling Lu, Binglin Zhang, Ning Yao, Bingxian Ma, Yongmei Zhao. Preparation of nano-structure amorphous flat carbon film and its field emission properties // The 5th IVESC conference. 2004. P. 293.
3. Choi G. S., Son K. H., Kim D. J. Fabrication of high performance carbon nanotube field emitters // Microelectronic Engineering. 2003. № 66. P. 206—212.
4. Sun Z., Li Y. J., Chen G. Y., Lau S. P., Tay B. K., Chen J. S. Fabrication of carbon nanotube film arrays for field emission flat panel display application // Surface Review and Letters. 2001. Vol. 8. № 5. P. 505—508.
5. Yanlai Ren, Dan Zhu, Dejie Li. Low temperature carbon nanotube growth on Ni—CaF₂ coated sodalime glass substrate using thermal CVD method // The 5th IVESC conference. 2004. P. 159.
6. Редькин А. Н., Маляревич Л. В. Получение углеродных нановолокон и нанотрубок методом сверхбыстрого нагрева паров этанола // Неорганические материалы. 2003. Т. 39. № 4. С. 433—437.

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

УДК 621.3

В. Г. Градецкий, д-р техн. наук, проф.,
М. М. Князьков, **Л. Н. Кравчук**, **Е. А. Семенов**,
Институт проблем механики
Российской академии наук, г. Москва

МЕТОДЫ ДВИЖЕНИЯ МИНИАТЮРНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВНУТРИТРУБНЫХ РОБОТОВ*

Представлены результаты анализа современного состояния и тенденций развития миниатюрных управляемых многозвенных роботов, перемещающихся внутри трубок малых диаметров. Рассмотрены наиболее перспективные схемы, особенности конструктивных решений и методы реализации управляемых движений миниатюрных внутритрубных роботов, разработанные на основе компьютерного и натурного моделирования. Показаны перспективы развития направления и использования миниатюрных роботов для решения специальных задач автоматизации процессов.

Введение

Последние десять лет ведутся интенсивные фундаментальные и прикладные исследования в веду-

щих институтах и лабораториях мира по созданию миниатюрных внутритрубных роботов, представляющих собой однозвенную или многозвенную управляемую механическую систему [1—6]. Звеньями служат мехатронные модули, в которых вращательные и поступательные движения осуществляются с помощью микродвигателей, встроенных в шарниры. Распределенные системы управления на основе микропроцессорной техники реализуют не только традиционные, но и новые законы управления с применением методов компьютерного моделирования, виртуальной реальности и CAD/CAM [7—9]. При проектировании и создании действующих прототипов используются методы мехатроники и способы реализации движений биосистем, таких как различные ползающие насекомые, змеи, ящерицы, черви [10—15]. Выполненное моделирование и экспериментальные исследования миниатюрных роботов позволили изучить особенности их разнообразных движений, состоящих из связанных между собой механически и информационно отдельных модулей. Компьютерное моделирование движений многозвенных миниатюрных роботов направлено на развитие методов распределенного управления на основе локального обмена информацией об изменении динамических параметров между отдельными модулями и на разработку алгоритмов управления, адекватных выполнению требуемых движений [9, 12]. Ранее было исследо-

* Работа выполнялась в рамках гранта РФФИ № 05-01-00205 и была поддержана частично Программой 16 ОЭМПУ РАН: "Проблемы анализа и синтеза интегрированных технических и социальных систем управления".

вано движение змеи в искривленной трубе с гладкими стенками и была показана возможность создания тягового усилия за счет нормальных реакций взаимодействия тела змеи со стенками трубы.

В работе [13] выделены три типа движения змей, из которых один (прямолинейные движения) требует перераспределения массы змеи относительно ее тела, а два других (при которых тело змеи извивается) возможны только при наличии выступов или стенок, в которые змея могла бы упереться боком.

Биомеханическим и инженерным аспектам волнообразных движений посвящены книги [4, 14].

Перспективы развития миниатюрных управляемых внутритрубных роботов определяются разнообразными применениями для технической диагностики турбин, двигателей, компрессоров в энергетическом машиностроении, для гуманитарного разминирования, в медицинской технике, в системах био- и нанотехнологий [10, 11].

Особенности и методы формирования движений многозвенных роботов внутри труб малых диаметров

Проблема движения миниатюрных роботов внутри труб малых диаметров до настоящего времени полностью не решена, что объясняется особенностями, связанными с малыми диаметрами труб (от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров) и возможными экстремальными условиями внутри труб, такими как наличие вязких жидкостей, засорений, радиации и т. п. Возникают трудности адаптации к изменению внутренних диаметров и обеспечения реверсивного движения. Традиционные методы движения с использованием миниатюрных колес не приводят к желаемым результатам, поэтому были разработаны нетрадиционные методы движения с использованием бионических методов реализации движения, принципов мехатроники и модульного способа проектирования.

Отметим [1–3] методы движения посредством локомоций, некоторые из решений которых приведены на рис. 1. Роботы, построенные по модульному принципу, снабжены миниатюрными системами телеуправления и могут перемещаться не только внутри труб, но и проникать в различные грунты. Основное назначение их состоит в обнаружении взрывчатых веществ. Локомоции в показанных на рис. 1, а системах выполняются посредством перистальтических движений, при этом периодические закрепления корпусов с поверхностью трубы осуществляются с помощью игл, которые могут поворачиваться на определенные углы. Движение модулей может осуществляться с помощью преобра-

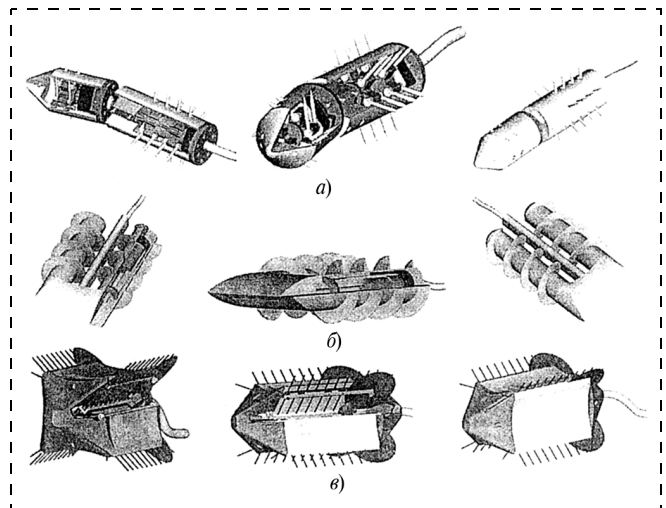


Рис. 1. Примеры, иллюстрирующие методы формирования движения миниатюрных роботов внутри труб малых диаметров и для проникновения в грунт в целях обнаружения взрывчатых веществ

зования винтовых вращательных движений в поступательное перемещение корпуса (рис. 1, б).

Принцип перемещения ползающих роботов (рис. 1, в) реализуется посредством вращательных движений щеток корпусов, снабженных иглами. Возможна реализация движений иных бионических систем, таких как змеи, червяки, проектирование которых основано на использовании многозвенных мехатронных систем. Каждый из модулей может иметь одну или несколько степеней свободы и выполнять определенную функцию, например, генерировать перистальтические движения или управлять направлением перемещения, выполнять функции носителей микродатчиков, микроинструмента, микротелекамер, источников питания.

Циклы червеподобных движений могут быть реализованы за счет расширения и продвижения эластичных корпусов посредством управляемых пружин (рис. 2). Такие модули могут иметь три и более степеней свободы, а изготовленные из специальной резины или тонкостенного металла корпуса-сильфоны предохраняют от попадания грязи, жидкости или вредных веществ внутрь. Способные деформироваться корпуса выполняют роль функции управляемых упоров. Конструкция управляе-

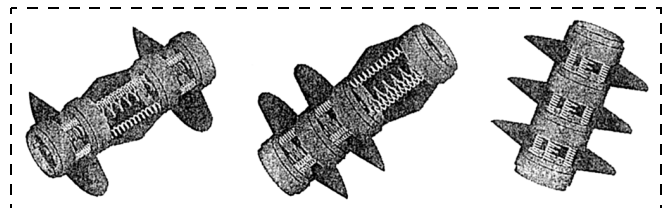


Рис. 2. Управляемый модуль робота перемещения путем генерации перистальтических движений

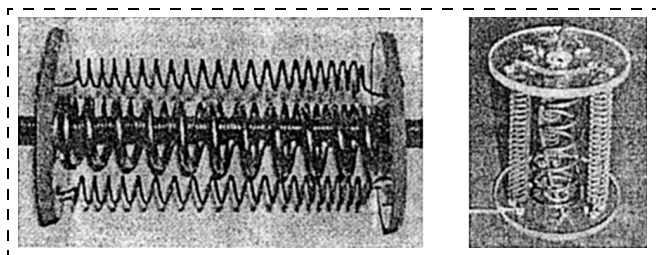


Рис. 3. Управляемые пружины модуля генерации перистальтических движений

мых пружин модуля генерации перистальтических движений представлена на рис. 3.

Приведенные примеры иллюстрируют особенности движений роботов внутри труб и некоторые способы их реализации.

В настоящее время разработано большое число разнообразных движителей для миниатюрных роботов-труболазов [3—12] и выполнено моделирование их движений, в том числе для роботов, способных двигаться внутри кровеносных сосудов [5].

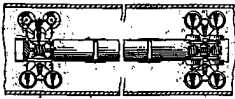
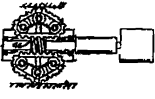
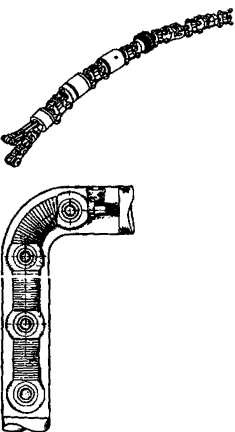
Интерес представляет анализ сравнительных оценок характеристик различных наиболее часто

используемых принципов действия миниатюрных роботов-труболазов (см. таблицу).

Выбор типа движителей для миниатюрных роботов, перемещающихся внутри труб малых диаметров до 80 мм, зависит не только от технических характеристик самих движителей, но и от условий их применения в различных условиях и средах. Некоторые типы движителей с высокими показателями параметров движения не могут применяться в специальных средах, например, в вязких жидкостях или в условиях повышенной радиации. Вместе с тем, в ряде случаев движители с худшими параметрами движения могут быть использованы для реализации перемещений в экстремальных условиях или в специальных средах. Возникает задача выбора некоторых оценочных показателей. Вследствие этого для оценки различных способов перемещения внутри труб малых диаметров и выявления сравнительных показателей методов движения был проведен анализ имеющихся технических решений в патентной литературе и в практике экспериментальных исследований [12—14].

№ по пор.	Место движения и тип приводной системы	Принципиальная типовая схема	Источник питания	Основные параметры (в зависимости от размеров и назначения)	Автономное движение	Возможность преодоления закруглений
1.	1.1. Пушпульный электромагнитный		Постоянный ток 12 В; до 3 А	$v = 10 \div 30$ мм/с $f = 10 \div 50$ Гц	Возможно	При $R > 0,25$ м
	1.2. Пушпульный с регулируемыми упорами		Сжатый воздух	$v = 10 \div 30$ мм/с $f = 10 \div 20$ Гц	Отсутствует	При $R > 0,5$ м
	1.3. Пушпульный с регулируемыми упорами		Сжатый воздух	$v = 10 \div 30$ мм/с $f = 10 \div 20$ Гц	Отсутствует	При $R > 0,4$ м
2.	Электродвигатели с упругой или жесткой передачей и регулируемыми упорами		Постоянный ток и сжатый воздух (переменный ток) 12 В; до 5 А	$v = 10 \div 30$ мм/с $f = 10 \div 20$ Гц	Отсутствует	При $R > 1$ м
	2.2. С упругой передачей		Постоянный ток 12 В; до 2 А	$v = 10$ мм/с $f = 0,1$ Гц	Отсутствует	При $R > 1$ м
	2.3. С жесткой передачей (винтовая)		Постоянный ток 12 В; 1,5 А	$v = 20$ мм/с $f = 0,1$ Гц	Отсутствует	При $R > 1$ м

Продолжение таблицы

№ по пор.	Место движения и тип приводной системы	Принципиальная типовая схема	Источник питания	Основные параметры (в зависимости от размеров и назначения)	Автономное движение	Возможность преодоления закруглений
3.	Колесный с приводными двигателями		Постоянный ток (переменный ток) 12 В; 1 А	$v = 20 \text{ мм/с}$	Возможно	При $R > 1 \text{ м}$
			Постоянный ток (переменный ток) 12 В; 2,0 А	$v = 20 \text{ мм/с}$	Возможно	При $R > 1 \text{ м}$
			Постоянный ток (переменный ток) 12 В; 1,5 А	$v = 20 \text{ мм/с}$	Возможно	При $R > 1 \text{ м}$
4.	Многозвенная система с электродвигателями и концевыми упорами		Постоянный ток (переменный ток) 12 В; 4 А	$v = 10 \text{ мм/с}$	Возможно	Возможно
	4.1. Колесные движители		Постоянный ток 12 В; 3 А	$v = 10 \text{ мм/с}$	Возможно	Возможно, а также "X"-, "Y"-, "T"-образные пересечения
	4.2. Шарообразные движители					

Примечание. Представленные роботы-труболазы могут работать в специальных средах.

Анализ проводился по следующим выбранным группам движителей роботов-труболазов:

- пушпульный электромагнитный с регулируемыми упорами со сжатым воздухом;
- электродвигатели с упругой или жесткой (винтовой) передачей и регулируемыми упорами;
- колесный с приводными двигателями;
- многозвенная колесная система с электродвигателями и концевыми упорами, шарообразные движители.

Для каждой из вышеперечисленных групп были определены типовые принципиальные схемы, выбраны параметры оценки движения и определены основные характеристики, от которых зависит качество функционирования и возможность использо-

вания в целях расширения областей применения, выяснения ограничений на применения или установление условий, при которых использование возможно. Результаты были сведены в таблицу.

На основе электромагнитного принципа действия в Институте проблем механики Российской академии наук была разработана серия миниатюрных роботов модульной конструкции для движения в трубах диаметром от 2 до 60 мм. Модельный ряд внутритрубных миниатюрных роботов представлен на рис. 4.

Соединение модулей между собой обеспечивает построение многозвенных миниатюрных роботов (рис. 5), образующих цепочку модулей, переме-

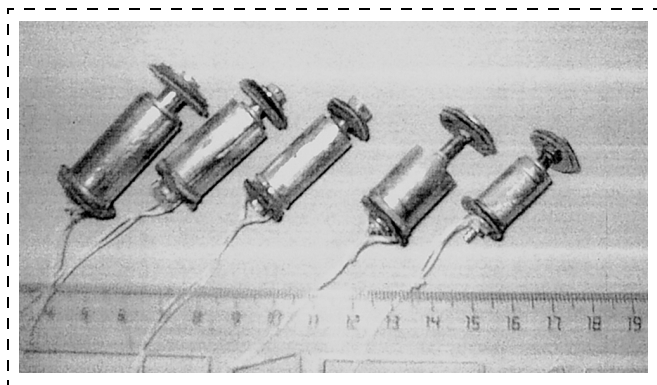


Рис. 4. Модельный ряд внутритрубных роботов

щающихся наподобие "змеи" как внутри труб, так и по плоскости.

Каждый из модулей выполняет определенную функциональную нагрузку, например, сенсорный блок — в простейшем исполнении оснащен микротелекамерой, блоками управления, питания, беспроводной связи. Движение и сцепление с поверхностью осуществляется посредством пассивных или управляемых упоров, попеременно включаемых в соответствии с алгоритмом движения.

В будущем весьма перспективным является использование биомеханических явлений и процессов для создания специальных полимеров, обеспечивающих надежное удержание робота на поверхности.

Примером служит использование принципов передвижения ящерицы геккона и достижений нанотехнологий. Так, ученые из университета Карнеги-Меллон в американском городе Питтсбурге, штат Пенсильвания, работают над созданием материала со сверхвысоким сцеплением, который позволит роботу перемещаться не только по внутренним поверхностям вертикально расположенных трубок, но и по наклонным или вертикальным пористым поверхностям различного качества.

Полимерный материал создается не с нуля, а повторяет те способности, которыми небольшие ящерицы гекконы обладают уже миллионы лет. Микроскопические волоски, покрывающие роговые пластинки на лапах геккона, позволяют ящерице не только удерживаться на вертикальных поверхностях, но даже бегать по ним. Ранее считалось, что такую способность животное получило благодаря особым химическим веществам, выделяемым из организма. Однако недавно было установлено, что за это ответственны силы межмолекулярного взаимодействия — силы Ван Дер Ваальса. На лапах геккона имеются специальные щетинки, сужающиеся на кончиках до долей микрометра и напоминающие по форме лопатку. Соприкасаясь с неровностями поверхности, миллионы щетинок

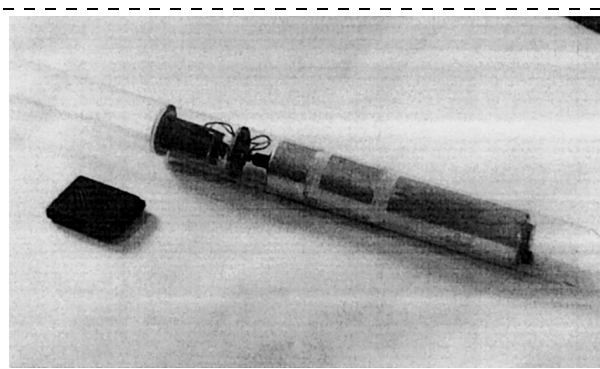


Рис. 5. Автономный многозвенный внутритрубный робот

обеспечивают достаточное сцепление, чтобы удерживать ящерицу на отвесной поверхности.

Моделирование движений миниатюрных внутритрубных многозвенных роботов

Моделирование движений миниатюрных многозвенных роботов внутри труб малых диаметров выполнялось на основе развития и адаптирования для решения подобных задач динамики систем

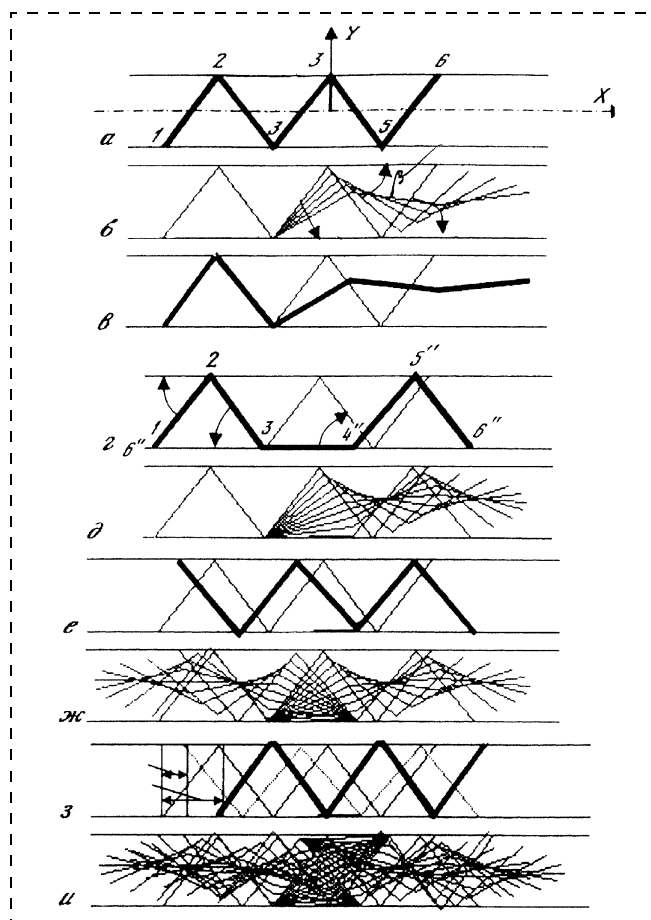


Рис. 6. Схема движения многозвенового робота внутри трубы

MEMCAD и Universal Mechanism. Применение метода к исследованию движений миниатюрных систем в реальном времени позволило выявить особенности мехатронной модели трехзвенного и пятизвенного миниатюрных роботов при действии электродинамических сил, сил сухого трения, адгезии, внешних гармонических возмущений. Были установлены условия реализуемости и особенности движений в трубках малого диаметра при определенных радиусах закруглений трубок.

В качестве примера приведена диаграмма движения пятизвенного робота в прямолинейной трубе (рис. 6). Звенья соединены между собой шарнирами, причем каждый шарнир имеет две степени свободы, реализуемые двумя встроенными микродвигателями. Всего использовалось восемь микродвигателей. Движение робота внутри трубы осуществлялось посредством поворота соответствующего звена относительно шарнира. Минимальное число звеньев для реализации продольного вдоль трубы движения оказалось равным пяти. На рис. 6, а—г представлены возможные вращения звеньев; на рис. 6, д—ж проиллюстрированы модельные движения при преобразовании вращательных движений в поступательные; на рис. 6, з, и показаны конечные движения при перемещении на один условный шаг.

Были получены оптимальные соотношения длин звеньев рис. 6, г при преодолении поворотов определенных радиусов закруглений трубы. Пример моделирования при преодолении радиуса кривизны приведен на рис. 7, где показаны возможности многозвенного пушпульного робота для преодоления поворота трубы. Для нормального прохождения пушпульным многозвенным роботом искривленного участка трубы необходимо, чтобы между модулями робота была гибкая сцепка, равная длине одного модуля робота, а каждый модуль многозвенного робота должен быть активным, чтобы не происходило заклинивания между корпусом робота и стенками трубы.

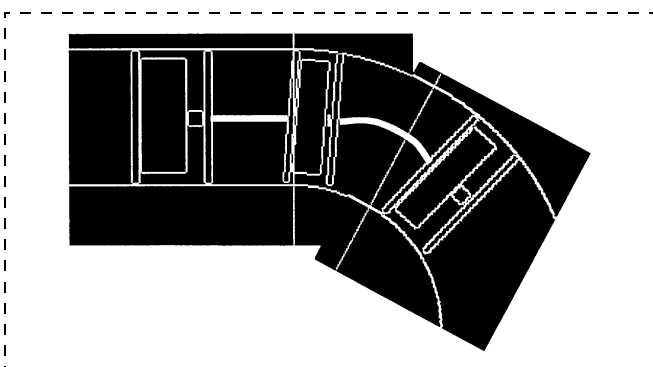


Рис. 7. Результат моделирования движений многозвенного робота внутри искривленного трубопровода

Заключение

Рассмотренные методы движения роботов внутри труб малых диаметров позволяют оценить и выбрать наиболее адекватно реализуемые для решения конкретных задач.

Обсуждаемые перспективы развития данного направления определяются во многом удачными областями применения, среди которых отметим техническую диагностику трубок в энергетических установках, доставку необходимых объектов в нужное место трубы, в медицинских использованиях, для био- и нанотехнологий.

Список литературы

1. Yim M., Duff D., Roufas K. Distributed robotics — Walk on the wild side // IEEE Robotics and Automation. Magazine. 2002. V. 9. N 4. P. 49—53.
2. Cepolina E., Molfino R., Zoppi M. The PMAR LAB in humanitarian demining effort // Proceed. of Intern. WS Robotics and Mechanical assistance in humanitarian demining a similar risky interventions. Belgium, Royal Military Academy. 2004. P. 1—6.
3. Gray J. Animal Locomotion. London: Widenfeld & Nicolson. 1968.
4. Добролюбова А. И. Бегущие волны деформации. Минск: Наука и техника, 1987.
5. Космодемьянская Г. Н., Сорокина С. И. Особенности определения поля давления при движении микрокапсулы в трубках малого диаметра // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 2. С. 17—24.
6. Градецкий В., Князьков М., Соловцов В., Кравчук Л. Мобильные роботы, предназначенные для спасательных и вспомогательных работ в экстремальных условиях // Тр. 7-й Всероссийской конференции "Актуальные проблемы защиты и безопасности". Т. 4 "Экстремальная робототехника". С.-Петербург. 2004. С. 59—64.
7. Myers D. Pipe and duct application for CLAWAR machines // Proceed. of 4th international Conference on Climbing and Walking Robots, professional Engineering publishing Ltd., UK. 2001. P. 1045—1052.
8. Градецкий В. Г., Князьков М. М., Кравчук Л. Н., Соловцов В. Н. Микропроцессорное управление движением миниатюрных роботов внутри труб малых диаметров // Микросистемная техника. 2002. № 8. С. 11—19.
9. Градецкий В. Г., Пушкин М. М. Исследование динамических процессов в микророботах // Материалы VIII Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике. 2001.
10. Мальцев П. П., Никифоров А. Ю. Технология и изделия микроэлектромеханики // Микросистемная техника. 2001. № 10. С. 18—24.
11. Klimov D., Gradetsky V., Rizzotto G. G. Micromechanics and Advanced technologies // Proceed. of IARP Workshop on Microrobots, Micromachines and Microsystems, Moscow. IPM RAS. 2003. P. 17—44.
12. Rizzotto G. G., Amato P., Gradetsky V., Solovtsov V., Kniazkov M. Simulation and Modeling of Electro-Magnetic Mechatronic Microsystems // Proceed. of IARP Workshop on Microrobots, Micromachines and Microsystems. Moscow. IPM RAS. 2002. P. 97—106.
13. Черноуско Ф. Л. Управление движением многозвенника на шероховатой плоскости // Тр. Института математики и механики УРО РАН. 2000. Т. 6. № 1.
14. Градецкий В., Вешников В., Калинин С., Кравчук Л. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно расположенным в пространстве поверхностям // М.: Наука, 2001. 360 с.

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

В этом номере мы начинаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области физики, математики, информатики, механики, химии и биологии и поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) по итогам конкурса 1999 г. Эти отчеты представляют определенный интерес для специалистов в области микро- и наносистемной техники. Общий список работ опубликован в "Информационном бюллетене РФФИ", № 7, 1999 г. (<http://www.rfbr.ru>).

Электрон-фононные процессы в полупроводниковых наноструктурах — оптические исследования

Номер проекта: 99-02-18276
Год представления отчета: 2002

Экспериментально и теоретически исследовались процессы взаимодействия акустических фононов с электронными состояниями в различных полупроводниковых наноструктурах:

1. В полумагнитных квантовых ямах измерена зависимость эффективной температуры спиновой системы ионов Mn^{2+} в присутствии неравновесных баллистических фононов от магнитного поля в структурах с квантовыми ямами $CdMnTe$ с различной концентрацией Mn . Показано, что полумагнитные квантовые ямы возможно использовать в качестве фононного спектрометра в диапазоне энергий 0,1–1 мэВ. Впервые измерено время спин-решеточной релаксации в полумагнитных квантовых ямах (Cd , Mn , Mg) Te . Данные измерения времени спин-решеточной релаксации не подвержены влиянию эффекта фононного узкого горла. На основании измеренных зависимостей спин-решеточного времени от температуры, концентрации Mn и магнитного поля предложена модель спин-решеточной релаксации на кластерах, содержащих различное число ионов Mn . Впервые исследован эффект легирования полумагнитных квантовых ям на скорость спин-решеточной релаксации. Показано, что присутствие двумерного газа свободных носителей в квантовых ямах существенно уменьшает время спин-решеточной релаксации. Реализована возможность внешнего управления временем спин-решеточной релаксации в полумагнитных структурах с квантовыми ямами, содержащих двумерный дырочный газ под действием оптического возбуждения. Из сравнения полученных экспериментальных результатов с теоретическими расчетами получена фундаментальная информация о механизмах спин-решеточной релаксации в полумагнитных наноструктурах в магнитном поле, когда спектр свободных носителей представляет собой набор уровней Ландау. Разработана ме-

тодика и проведены первые эксперименты по исследованию спин-решеточной релаксации в полумагнитных квантовых точках.

2. Теоретически рассчитаны времена туннелирования электронов с участием акустических фононов в структурах с двойными квантовыми ямами $GaAs/AlGaAs$. Показано, что при рассмотрении релаксации и туннелирования электронов в реальных структурах с двойными квантовыми ямами необходимо учитывать процессы упругого рассеяния электронов на неоднородностях гетерограниц.

3. Измерены времена жизни высокочастотных фононов в пленках аморфного кремния, содержащего 5-нанометровые нанокристаллиты Si . Вычислено время ангармонического распада высокочастотных фононов в нанокристаллическом кремнии и теоретически исследована зависимость времени распада от размера нанокристаллических кластеров. Из сравнения с экспериментом определен средний размер нанокристаллитов Si и энергетическая ширина локализованных фононных состояний.

4. Исследован эффект увеличения квантового выхода фотолюминесценции под действием подзонного света 1,06 мкм в структурах с квантовыми точками $InAs/GaAs$. Максимальное относительное увеличение квантового выхода в отдельных образцах составило 40 %.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Управление ростом полупроводниковых пленок на атомном уровне

Номер проекта: 99-02-17382
Год представления отчета: 2001

Методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) в условиях сверхвысокого вакуума *in situ* исследованы атомные структуры на поверхностях $GaAs(001)$, выращенных методами молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке $GaAs(001)$ в широком диапазоне отношения концентраций $[Ga]/[As]$. При различных As -покрытиях на подложке $GaAs(001)$ образуются фазы 2×4 -альфа, бета, гамма, $c(4 \times 4)$. На основе полученных

СТМ-изображений с атомным разрешением, картин ДБЭО и результатов расчетов интенсивности рассеяния рефлексов, выполненных в рамках динамической теории дифракции, показано, что фазы 2×4 -альфа, бета и гамма в основе имеют одинаковую единичную структуру в поверхностном слое, который состоит из двух димеров As и пары As-димерных вакансий. Разработана полная структурная модель As-стабилизированной поверхности GaAs(001).

На обогащенных Ga поверхностях GaAs(001) исследовались фазы 4×2 и 4×6 . Предложена унифицированная модель, в которой фаза 4×2 состоит из двух димеров Ga в верхнем слое и димера Ga в третьем слое, а фаза 4×6 размещается в соответствии с периодически расположенными кластерами Ga на углах элементарной ячейки.

Методами СТМ и ДБЭО в условиях сверхвысокого вакуума *in situ* изучались атомные структуры на поверхности гетеросистемы InAs/GaAs, выращенной методами молекулярно-лучевой эпитаксии. Обнаружено, что нанесение примерно 0,3 монослоя In на обогащенную As поверхность GaAs(001)- 2×4 приводит к образованию фазы 4×2 , а нанесение примерно 0,6 монослоя In — к появлению новой реконструкции 6×2 . Получена детальная, на атомном уровне, информация о начальных стадиях роста гетероструктуры InAs/GaAs(001), осуществлявшихся по механизму Странского—Крастанова, и о возникающих при этом поверхностных реконструкциях. Изучены с атомным разрешением структуры доменных стенок при двумерном росте гетероэпитаксиальных пленок InAs. Разработаны геометрические модели поверхностей со структурой 4×2 и 6×2 . Показано, что послойный двумерный эпитаксиальный рост InAs на GaAs(001) вплоть до 13 монослоев возможен только в том случае, если фронт роста воспроизводит симметрию 4×2 или 6×2 подложки.

Впервые получены изображения с атомным разрешением фасетированных плоскостей на поверхности трехмерных островков в гетеросистеме InAs/GaAs(001) и разработаны их структурные модели.

Башкирский государственный университет

Экситонные процессы в сверхразветвленных полимерных структурах — нерегулярных фракталах

Номер проекта: 99-02-17326
Год представления отчета: 2002

Предложены для изучения экситонной динамики и синтезированы новые сверхразветвленные полимеры — полифенилгерманий PPG и на базе 1,3,5-triphenylbenzene (TPB), обладающие значи-

тельным выходом люминесценции. Детально проанализированы оптические свойства новых сверхразветвленных полимеров (полифенилгерман) как чистого, так и с примесями Ln (Eu, Tb), важных для создания эффективных светоизлучающих диодов. Исследованы люминесцентные характеристики ряда новых гетеромакроциклических молекул А-В-А-В. Получены первые дендримеры G-1 и G-2. Продемонстрирован "антенный" эффект переноса энергии возбуждения к иону Sm, расположенного в центре дендримера G-2. Проводились исследования люминесцентных характеристик (спектры излучения и поглощения, кинетика флуоресценции в наносекундном диапазоне, квантовый выход-QY). Исследования показали высокий QY (0.3) для TPB. Разработаны методы нанесения тонких (менее 1000 Å) пленок исследуемых полимеров на покрытые проводящим электродом (ИТО) кварцевые подложки с последующим напылением в вакууме металлических электродов (top electrode) для получения сэндвичевых структур светоизлучающих диодов. Создана уникальная установка для исследования сверхразветвленных полимеров методами оптической микроскопии ближнего поля с использованием фемтосекундной лазерной системы. Взаимодействие хромофорных групп в дендримерных макромолекулах, исследованное методами фемтосекундной спектроскопии, дало новую информацию о характере возбуждений в конкретных дендримерах. Исследование фемтосекундной динамики люминесценции полимера S119 позволило связать большой нелинейный показатель преломления с формированием внутримолекулярных агрегатов. Проведено исследование новых материалов для создания LED и фотовольтаических ячеек на базе разветвленных конъюгированных полимеров с квантовыми точками (наночастицами) CdS и ZnS, полученные методом лазерной абляции в жидкости, и углеродными нанотрубками. Методами компьютерного моделирования исследовались реакции рекомбинации на дендримерных структурах и миграция экситонов в регулярных дендримерах различной генерации и степени ветвления. Результаты доложены на международных конференциях и опубликованы в печати.

Центр физических исследований им. П. Н. Лебедева

Физика акустических фононов в полупроводниковых наноструктурах на основе Si/Ge-Si и соединений A2B6

Номер проекта: 99-02-17183
Год представления отчета: 2002

Исследовано поведение неравновесных акустических фононов в полупроводниковых нанострук-

турах на основе CdTe/ZnTe и Si/Ge-Si. С помощью метода тепловых импульсов изучалось распространение неравновесных акустических фононов в монокристаллах ZnTe и CdTe (с наличием двойниковой структуры и без нее). Обнаружено явление фокусировки фононов в ZnTe, а также формирование "горячего фононного пятна". Для CdTe получены значения константы ангармонического распада фононов и обнаружено, что плоскости двойникового вносятся дополнительное рассеяние для фононов. При исследовании фотолюминесценции ультратонкой квантовой ямы CdTe в ZnTe обнаружено аномальное влияние потока неравновесных акустических фононов в латеральном направлении (вдоль интерфейсов CdTe/ZnTe) на линию фотолюминесценции. Предполагается, что поток фононов формируется поверхностными и интерфейсными фононами. Проведены эксперименты по измерению отражения акустических фононов от интерфейсов Si/Ge-Si в образцах с квантовыми ямами.

Отделение физики твердого тела Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

Исследование механизмов образования кристаллических углеродных нанотрубок с целью обеспечения их управляемого роста на подложках специальных форм, и исследование их автоэмиссионных свойств

Номер проекта: 99-02-17444
Год представления отчета: 2001

Разработаны новые варианты метода получения углеродных нанотрубок из газовой фазы при атмосферном давлении: при разложении паров ацетона и при диспропорционировании CO с использова-

нием газовой смеси ($\text{CO} + \text{CO}_2$). Оба процесса осуществлялись в потоке с аргоном в качестве газоносителя. Преимущество метода с использованием ацетона заключается в возможности использовать малые (примерно несколько кубических сантиметров) количества жидкого ацетона, что важно с точки зрения техники безопасности, а также доступности и дешевизны исходного компонента. Использование смеси ($\text{CO} + \text{CO}_2$) обладает тем преимуществом, что кроме компоненты CO, обеспечивающей рост нанотрубок, присутствует компонента CO_2 , сгорающая углерод, главным образом слабосвязанный, т. е. аморфный.

Обоими методами впервые, насколько нам известно из литературы, выращены нанотрубки на нитевидных кристаллах кремния. Температуры роста были в пределах 700–900 °C, в качестве катализатора использовали напыленные слои (~10 нм) кобальта или никеля. Нанотрубки росли как на вершинах нитевидных кристаллов, так и на их боковой поверхности; они были индивидуальными, не образующими никаких сложных образований, обычно многостенные, длиной до нескольких десятков микрометров (за 5–10 мин.). Подложки кремния с нитевидными кристаллами имели такую геометрию и кристаллографическую ориентацию, которые позволяли исследовать выращенные нанотрубки без всякой предварительной обработки в просвечивающем электронном микроскопе высокого разрешения. Системы "углеродные нанотрубки на нитевидных кристаллах кремния" могут быть перспективными для применения в качестве эмиттеров.

Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Пленки из наночастиц формируют "резиновые" нанотрубки

Исследователь Шахрау Чиеб из Иллинойского университета создал гибкие кремниевые нанотрубки. Это удалось сделать благодаря синтезу из наночастиц кремния нанопленки, которую затем свернули в трубку. Полученные нанотрубки гибкие, как резина, и могут проводить электричество. Похожие структуры отдаленно напоминают нанотрубки, они больше всего подходят на миниатюрные свитки.

"Эти миниатюрные наносвитки могут быть полезны в качестве катализаторов химических реакций.

Также наносвитки будут применяться в нанороботехнике, наноэлектронике и микроскопических лазерах", — говорит Шахрау, профессор механики и промышленной инженерии из университета Иллинойса.

Для того чтобы сделать нанотрубки-свитки, Чиеб и его коллега профессор физики Адам Смит взяли за основу коллоидную спиртовую суспензию кремниевых наночастиц (каждая наночастица кремния в диаметре составляет около 1 нм). Суспензию поместили в сильное электростатическое поле, после чего наночастицы переместились к положительно заряженной плоскости контейнера, где они находились, образовав тонкую пленку. Когда пленка была высушена,

ученые свернули ее в нанотрубку. После измерения образцов ученые установили, что диаметр полученных образцов колеблется от 2 до 5 мкм, а их длина составляла около 100 мкм.

Используя атомно-силовой микроскоп, ученые измерили модуль Юнга (модуль Юнга — это показатель эластичности механического объекта) нанотрубок. Оказалось, что он в 5000 раз меньше модуля Юнга для кристаллического кремния и всего в 30 раз больше значения эластичности для резины. Грубо говоря, полученные нанотрубки из кремния чуть жестче аналогичных образцов из резины. Поскольку кристаллический кремний совсем не может изгибаться, то достижение ученых из Иллинойса будет использоваться в первую очередь в микроэлектронных устройствах: гибких мониторах и компьютерах, умной одежде и электронных продуктах для медицины.

"Мы предполагаем, что нанотрубка, или наносвиток, состоит из кремниевых наночастиц, которые связаны между собой атомами кислорода и образуют трехмерную структуру, похожую на сеть, — говорит Чиеб. — А необычно высокая гибкость наноматериала вызвана тем, что кремниевые наночастицы не связаны кристаллической решеткой, а структурированы совместно с атомами кислорода. Для создания этих наносистем мы использовали новый метод, который может применяться при конструировании дешевых лабораторий-на-чипе."

Ученые предвидят еще несколько областей для применения нанотрубок. "Так как кремниевые наночастицы, из которых состоят наносвитки, характеризуются такими свойствами, как фотолюминесценция, фотостабильность и фотоэмиссия, то вполне вероятно, что на их основе можно сделать фотодиоды и гибкие лазеры, которыми можно будет управлять с помощью электрического поля", — говорит Адам.

Источник: EurekAlert (http://www.eurekalert.org/pub_releases/2005-06/uoia-tfo061405.php)

Кисть из нанотрубок

На сегодняшний день ученые довольно много узнали о свойствах нанотрубок. Пришло время составлять из них сложные конструкции и наносистемы. Однако первую более-менее сложную структуру, изготовленную из нанотрубок, можно смело назвать "нановеником". Профессор Паликэль Аджаян (об этом ученом, работающем в области исследования свойств нанотрубок, мы уже писали) и его коллеги из Политехнического института в Нью-Йорке создали самую маленькую в мире щетку, щетинки которой — не что иное, как отдельные нанотрубки. Диаметр каждой нанотрубки 30 нм, т. е. каждый волос щетки в тысячу с лишним раз тоньше человеческого волоса.

Исследователи не собирали веник "по волоску", а вырастили нанотрубки прямо на ручке щетки. А чтобы вся ручка не обросла ворсом из нанотрубок, ученые покрыли ее местами тончайшим слоем золота. Нанотрубки они выращивали, используя обычный метод синтеза нанотрубок, состоящий в том, что в ат-



Рис. 1. Щетка из нанотрубок в действии

мосфере горячего газа, содержащего углерод, на нитях углеродистого силицида происходит рост этих наноструктур.

Как и обычные щетки, это достижение нанотехнологий имеет несколько способов применения: ими можно "подметать" нанопыль (рис. 1) на сверхминиатюрных НЭМС и МЭМС устройствах, окрашивать микроструктуры и удалять загрязнители из воды. Также кистью можно прочищать тонкие капилляры подобно тому, как мы чистим бутылки ершиком. Поэтому нанокисть, по мнению изобретателей, будет востребована медиками — они смогут использовать ее в будущем для "прочистки" сосудов и удаления атеросклеротических бляшек.

Как говорит Аджаян, эта щетка — одно из первых гибких наноустройств. Это свойство очень полезно в наномире, так как многие микро- и нанообъекты имеют сложную геометрию, а гибкий инструмент с большим числом степеней свободы сможет проникнуть даже в самые труднодоступные места.

Как говорят исследователи, щетка проводит электричество. Этого и стоило ожидать, ведь углеродные нанотрубки сами по себе хорошо проводят электричество.

Исследователи даже попытались сделать зубную "наношетку"! Один из исследователей предполагает, что такие щетки будут полезны при нанесении ультратонких покрытий на труднодоступные места. С их помощью можно будет даже отлавливать отдельные вирусы и бактерии, предварительно покрыв устройство специфическими антителами.

Источник: BBC NEWS: Brush Up Your Nanotechnology (<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/4085214.stm>)

"Печатный станок" и экспресс-анализ ДНК

Как в свое время печатный пресс положил начало эры книгопечатания, так и в наше время разработанная исследователями из Массачусетского технологического института (MIT) технология нанопечати ("на-

po-printing") позволит начать массовое производство наноустройств и биочипов на ДНК-основе.

Один из первых кандидатов на роль будущего массового печатного продукта — ДНК-матрицы для экспресс-диагностики различных заболеваний. Так, например, болезнь Альцгеймера или СПИД в анализе пациента можно будет определить с помощью ДНК-биочипа за несколько минут. Эти экспресс-анализаторы могут вскоре появиться в больницах благодаря дешевому производству этих анализаторов с помощью технологии "печатного пресса".

Необходимость в технологии дешевого массового производства наноустройств появилась с открытием первого ДНК-анализатора на основе микрожидкостных систем. К сожалению, все без исключения методы производства на сегодняшний день не могут гарантировать нужную точность изготовления при производстве НЭМС в больших количествах, а если точность соблюдается, то стоимость производства существенно возрастает.

Ученые из МИТ не стали выдумывать ничего нового, а взяли за основу своего "печатного пресса" уже существующую в природе технологию копирования ДНК и РНК. Как сказал профессор Стеллаччи, руководитель исследований, "Природа придумала самый эффективный метод печатания наноструктур на примере дубликации молекул ДНК". Новый метод исследователи назвали супрамолекулярным нанопечатаем (Supramolecular NanoStamping — SuNS). Он состоит в том, что цепи ДНК, нанесенные специальным образом на подложку, формируют такую же матрицу из комплементарных им цепей на другой матрице (рис. 2). Процесс прост и его можно повторить неограниченное число раз. При этом полученная структура имеет ту же геометрию, что ДНК-оригинал.

Одно из таких устройств — ДНК-матрицы, уже используемые для анализа ДНК человека. На маленькой стеклянной подложке расположены около 500 000 "точек", содержащих молекулы ДНК. Однако стоимость такой матрицы довольно высока — около \$500 долл., и для ее создания необходимо проделать 400 операций по нанесению ДНК-точек. Естественно, что такая ДНК-анализирующая система не поль-

зуется спросом на рынке медицинской экспресс-диагностики "на каждый день".

Поэтому заявления ученых из МИТ вселяет оптимизм: они утверждают, что могут создавать такой же массив всего за три производственных операции. И стоить готовый продукт будет менее \$50. "Наша технология может полностью изменить систему диагностики заболеваний и экспресс-анализирования ДНК", — говорит Стеллаччи. — "Быстрая диагностика таких заболеваний, как СПИД, гепатит и болезнь Альцгеймера, станет обычной рутинной задачей".

Другое преимущество этой технологии состоит в том, что кроме диагностики заболевания врач-диагност сможет получить о нем самую детальную информацию. "Чем больше мы будем делать ДНК-матриц и чем больше будем анализировать заболеваний, тем больше мы о них узнаем", — говорит Стеллаччи.

Технология SuNS может быть полезна не только в диагностике болезней. На ее основе можно производить наноструктуры из металлов или полупроводников практически любой двумерной геометрии. Также на ее основе можно дешево производить в большом количестве наножидкостные системы, одноэлектронные транзисторы, оптические биосенсоры и нанопроводники.

Источник: Nanotech-Now: New technique may speed DNA analysis (http://www.nanotech-now.com/news.cgi?story_id=09664)

Новый инструмент визуализации наномира: яркие квантовые точки

Ученые из Корнелльского университета создали новый тип ярких квантовых точек, названных исследователями "Cornell Dot". Эти наноструктуры практически универсальны: их можно использовать в медицине, компьютерной технике, микроэлектронике и биотехнологии.

Новая технология, разработанная исследователями, заключается в том, что квантовые точки обрабатывают, нанося на них специальное кремниевое покрытие, и добавляют специфические метки, которые позволяют придавать "Cornell Dot" различные свойства. Так, например, можно сделать квантовые точки флуоресцентными и использовать их для исследования живых тканей с помощью оптической микроскопии. "С помощью наших квантовых точек ученые могут проводить исследования, которые без их использования невозможны", — сказал Ульрих Вайснер, профессор материаловедения из Корнелльского университета.

Квантовые точки — это наночастицы полупроводников (селенид кадмия, например), ведущие себя как отдельные атомы. Они могут поглощать световые волны, перемещая электроны на более высокий энергетический уровень, и выделять свет при переходе электронов на низкоэнергетический уровень. Благодаря этому свойству их и используют в качестве флуоресцентных меток.

С помощью оптического микроскопа мы не можем проследить за перемещением отдельных молекул

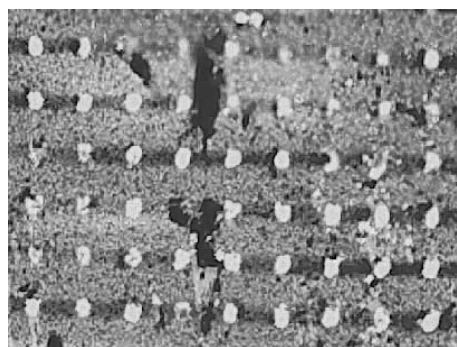


Рис. 2. Матрица ДНК-точек, изготовленная по SuNS-технологии (каждая диаметром около 200 нм)

внутри живой клетки, а с помощью электронного микроскопа отдельные молекулы видны, но для этого клетку приходится умертвить. Однако если снабдить квантовые точки специальными маркерами, то можно прикрепить эти наносистемы к отдельным типам молекул. Для клетки это не представляет вреда, и, что самое главное, результаты видны в оптический микроскоп благодаря флуоресценции маркеров. Поэтому исследователи используют квантовые точки в биологических исследованиях.

Что же нового удалось привнести в уже отлаженную процедуру исследований ученым из Корнелла? Во-первых, обычные квантовые точки химически активны, а это может негативно повлиять на проводимые с их использованием исследования. Во-вторых, они в 30 раз ярче обычных, что позволило "высвечивать" внутри клетки отдельные молекулы. И, в-третьих, они могут присоединяться только к тем молекулам, маркеры которых исследователи "запрограммируют" в квантовой точке. Все эти выгоды ученым принесла новая архитектура построения наночастиц: теперь квантовая точка — это довольно сложное программируемое наноустройство.

"Cornell dots", или "CU dots", — наночастицы, состоящие из ядра диаметром 2,2 нм, помещенного в кремниевую оболочку, содержащую молекулы флуоресцентной краски (рис. 3). Диаметр наночастицы целиком — 25 нм. Ученые назвали такое строение квантовой точки архитектурой "ядро—оболочка".

Ранее для нанесения на поверхность квантовой точки белкового маркера нужно было использовать дорогостоящий производственный процесс, который состоял в том, что квантовую точку инкапсулировали в полимер. Переход на кремний позволил значительно сократить стоимость диагностики и, как следствие, сделать ее общедоступной для больниц (для ранней диагностики рака, например).

Вайснер говорит, что "Кремний — это дешевый инертный материал, который, к тому же, легко нанести на поверхность квантовой точки. Вместе с тем, кремний — материал № 1 в электронике, а это дает уверенность в том, что у квантовых точек, инкапсулированных в нем, большое будущее в микро- и наноэлектронике. Например, благодаря длительной

флуоресценции "CU dots" можно сделать новые типы дисплеев или сконструировать из них оптический компьютер". В контрольном исследовании ученые выявили раковые клетки в образце ткани человека, больного лейкемией. Антитела иммуноглобулина Е (IgE), расположенные на поверхности раковых клеток, связывались с наночастицами, а результат было видно в оптический микроскоп.

Оптические свойства новых квантовых точек довольно необычны. Физики задались вопросом: почему эти квантовые точки такие яркие? Ведь суммарная яркость всех частей одной наночастицы меньше всей световой энергии, излучаемого ею. Было предложено несколько объяснений. Одно из них заключается в том, что кремниевая оболочка защищает флуоресцентные метки от контакта со средой.

Вне всякого сомнения, нанотехнологи вскоре получат еще один мощный инструмент визуализации наномира. "Умное" использование квантовых точек только начинается.

Источник: Cornell University: After quantum dots, now come glowing "Cornell dots", for biological tagging, imaging and optical computing (<http://www.news.cornell.edu/stories/May05/CUdots.ws.html>)

Фотонные транзисторы в кремниевом исполнении

Большинство электронных устройств в скором времени могут стать фотонными, т. е. вместо электронов, переносящих информацию, будут "курсировать" лучи света — фотоны.

Большинство экспертов в области микроэлектроники предвидят именно такой сценарий развития микроэлектроники, используемой в вычислительной технике. Эта область науки развивается уже с 1970 г. Фотоника (так называется эта новая область устройств, где в качестве основного сигнала используются отдельные фотоны) может применяться в таких областях, как телекоммуникации, маршрутизация Интернета, оптоволоконные сети, и, конечно, в создании "световых компьютеров".

Почему же так выгодно использовать фотонику вместо обычной электроники? Во-первых, фотонные устройства будут потреблять меньше энергии. Во-вторых, с помощью фотонных чипов можно будет оперировать большими объемами информации и, следовательно, скорость вычислений возрастет.

Грубо говоря, в фотонном чипе лучи света заменят ток электронов по проводникам в аналогичном электронном чипе. Вот почему фотонные чипы экономичнее электронных: фотоника гораздо меньше отдает теплоты в окружающую среду и, следовательно, меньше потребляет энергии для работы.

На сегодняшний день существует ряд прототипов нанофотонных устройств. Однако существует проблема: фотонные устройства надо органично "вписать" в море современной электроники. И для этого необходимо сконструировать устройство, которое обеспечивало бы взаимодействие между фотонными

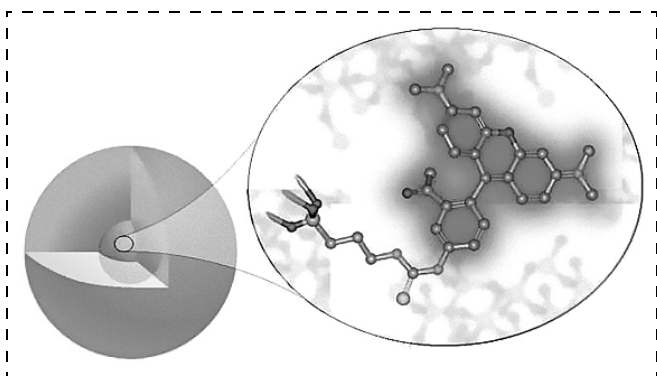


Рис. 3. Схематическое представление квантовой точки "Cornell Dot"

и электронными чипами. Такое устройство можно назвать "фотонным транзистором", или "фотонным ключом" (рис. 4). Его функция — пропускать световые волны при наличии соответствующего сигнала и не пропускать, если сигнала разрешения нет.

В Корнелльском университете (США) исследователям удалось приблизиться к решению этой проблемы. Они смогли создать устройство, которое переводит электрический сигнал в модулируемый световой луч в наноразмерном диапазоне. При этом размеры фотонного устройства позволяют использовать его в маршрутизаторах, оптоволоконных сетях и микропроцессорах.

Такие устройства удавалось делать и ранее, но их размеры составляли несколько миллиметров. Естественно, что связывать чип миллиметровых размеров с современными микросхемами по 90-нм техпроцессу было бы неэффективно. А ученые из Корнелла смогли сделать такой же чип размерами несколько микрометров. А такое устройство уже можно интегрировать с современными микросхемами.

Удалось это сделать благодаря использованию арсенида галлия. Этот полупроводник легко можно интегрировать в полупроводниковые устройства, и он в основном применяется в современной микроэлектронике.

О работе ученые сообщили в майском выпуске журнала Nature. Руководил исследованиями ученый из Корнелльского университета Майкл Липсон.

В основу нанофотонного модулятора лег кольцевой резонатор, который отстоит от прямого светового волновода на 200 нм (рис. 5). Свет, проходящий через прямой отрезок волновода, множество раз огибает кольцевой резонатор. Явление это широко известно и используется в фотонных устройствах. Причем от диаметра кольца напрямую зависит длина волны светового пучка на выходе из резонатора. Ученые использовали диаметры 10 и 12 мкм и получили свет с длиной волны 1555 и 1576 нм соответственно. Свет с такой длиной волны лежит в инфракрасном диапазоне длин волн.

Теперь расскажем о механизме модуляции света электроникой. Кольцо-модулятор расположено на поверхности из отрицательно допированного кремния, а внутри кольца — область с положительным до-

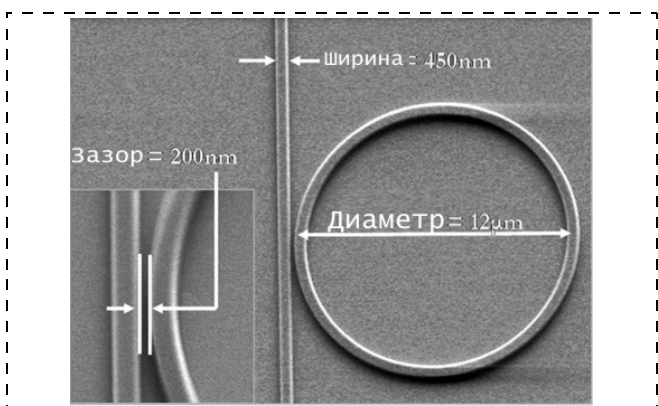


Рис. 4. Микрофотография фотонного чипа

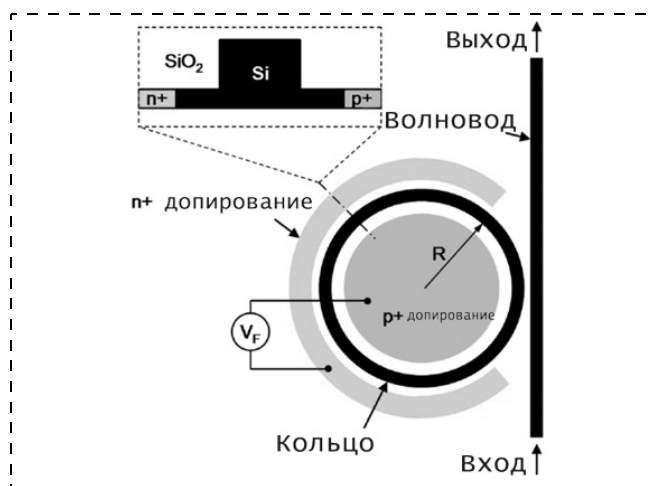


Рис. 5. Принцип действия фотонного ключа

пированием (см. рис. 5). Поэтому волновод представляет собой зону раздела между p - и n -областями p - n -диода, образованного структурой волноводов и полупроводников.

Как только на микросистему подают напряжение, электроны и дырки поступают в область волновода, изменяя его оптический коэффициент преломления. Соответственно, у волновода изменяется резонансная частота света, которую он может пропускать. Таким образом, напряжение "запирает" свет, проходящий через прямой отрезок волновода.

Ранее ученые использовали похожий принцип диода в фотонике для того, чтобы модулировать свет в прямых участках волновода. И это удавалось только тогда, когда свет проходил сравнительно большое расстояние по волноводу. Соответственно, для работы устройства нужен волновод большей длины и тогда чип будет уже макроскопических размеров. А ученые из Корнелла заставили бежать свет по кругу в резонансном кольце, тем самым удлинив его путь.

В тестах ученые подавали на устройство 0,3 В и этого хватало, чтобы прекратить распространение света по волноводу. Затем исследователи протестировали устройство на частоту включений. Результаты оказались довольно оптимистичными: с помощью кольца-резонатора ученые пропустили через фотонный транзистор 1,5 Гбит в секунду информации. Модулирование света позволило пропустить серию 0 и 1 за столь короткое время. А процесс передачи одного бита занимал несколько десятых пикосекунды.

Источник: Cornell News Service: Making the big step from electronics to photonics by modulating a beam of light with electricity (<http://www.news.cornell.edu/stories/May05/LipsonElectroOptical.ws.html>)

Магнитная flash-память на основе углеродных нанотрубок

Известно, что размеры углеродных нанотрубок сопоставимы с размерами молекул. Средний диаметр однослойной углеродной нанотрубки составляет око-

ло 1 нм. Если же удастся "заставить" одну нанотрубку хранить один бит информации, то память на их основе будет хранить колоссальные объемы информации, ведь современные ячейки flash-памяти, хранящие один бит информации, имеют размеры от 50 до 90 нм.

Ученые из Техасского университета уже довольно давно работают над проблемой создания flash-памяти на основе углеродных нанотрубок. Исследователи хотят добиться плотности хранения информации около 40 Гбит/см². Но и это еще не предел. Как утверждают исследователи, расположив нанотрубки в различных слоях памяти, можно создать трехмерный чип flash-памяти, который будет хранить информацию до 1000 Тбит/см³. Для сравнения, 1 Тбайт — это количество информации, которое можно записать на 26 DVD-дисках.

Архитектура flash-памяти на основе нанотрубок довольно проста (рис. 6): каждая ячейка памяти состоит из двух пересекающихся нанотрубок, содержащих внутри примеси железа или помещенных в ферромагнитное окружение. Ученые собираются хранить информацию в нанотрубках, используя принцип магнитной записи, аналогичный тому, что применяется в компьютерных винчестерах. В роли носителя информации выступит матрица нанотрубок. Как говорит один из исследователей, Лазло Киш: "... В матрице нанотрубок каждое место их пересечения может хранить один бит информации".

Ток, протекающий через немагнитный слой, окруженный двумя намагниченными слоями, зависит от их магнитной ориентации в пространстве. Каждый электрон имеет свою магнитную ориентацию, поэтому слои, ориентированные согласно с электронами, не будут препятствовать протеканию тока, в то время как слои, ориентированные противоположно, будут препятствовать протеканию тока.

В нанопамяти роль слоев будут играть пересекающиеся нанотрубки, магнитную ориентацию которых можно будет менять с помощью электрических импульсов различной полярности. А считывать логическое состояние "1" или "0" будут более слабые электрические сигналы определенной полярности. Таким образом, если магнитная ориентация нанотрубок установлена противоположно посылаемому импульсу считывания, то по низкой амплитуде тока импульса будет определяться значение "0". И наоборот, если магнитная ориентация нанотрубок совпадает с направлением электронов в импульсе, то амплитуда то-

ка импульса будет соответствовать логической "1". Полученная память будет энергонезависимой, т. е. при снятии напряжения с устройства данные на чипе будут храниться.

Как мы говорили ранее, нанотрубки характеризуются довольно малыми размерами и хорошей проводимостью электричества. "Благодаря этим двум факторам можно сделать предположение, что готовый чип будет хранить достаточно много информации и потреблять при работе мало энергии. Также скорость чтения/записи будет высокой — до 1000 Гбит в секунду", — говорит Киш.

Однако память на основе нанотрубок — только проект. В этом году ученые планируют изготовить прототип одной ячейки хранения данных для того, чтобы узнать, при каком напряжении и в каких условиях будет работать новое наноустройство. Далее, собрав несколько элементов в трехмерный слой, исследователи хотят создать первый трехмерный чип памяти. Как заявляет руководитель работ профессор Аджаян, прототип рабочего трехмерного чипа будет готов уже через пять лет.

Известно, что потребовалось около 15 лет для того, чтобы создать интегральные компьютерные чипы, разработанные Нобелевским лауреатом Джеком Килби. Работа над элементами на основе нанотрубок находится в таком же зачаточном состоянии, как и изготовление первого транзистора, поэтому внедрения этой технологии в нанoeлектронику придется подождать.

О результатах своей работы ученые доложили в февральском выпуске журнала *Applied Physics Letters*: "TerraByte flash memory with carbon nanotubes".

Источник: TRN: Nanotube memory scheme is magnetic (http://www.trumag.com/Stories/2005/051805/Nanotube_memory_scheme_is_magnetic_051805.html)

Батарейка на основе "нанотравы" от mPhase Technologies

Компания mPhase Technologies в сотрудничестве с Bell Labs и научно-исследовательским подразделением Lucent Technologies создала батарею, основанную на достижениях нанотехнологии. Ключевые преимущества нового источника питания — возможность интеграции в полупроводниковые изделия и большой срок хранения.

Во многих устройствах необходим резервный источник питания. Как известно, обычные батареи теряют около 10 % емкости за один год хранения, поэтому в таких случаях часто используют батареи, в которых химические материалы объединяются в нужный момент механическим способом. Эти изделия могут храниться достаточно долго, они надежны и могут обеспечить большую плотность энергии. К сожалению, такие батареи трудно сделать миниатюрными. Кроме того, процесс их производства слишком отличается от процессов производства полупроводниковых компонентов, и батареи не могут быть встроены непосредственно в микросхемы. Еще одним ограничением существующих батарей является потреб-

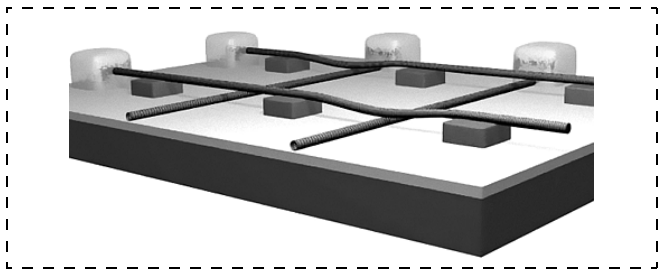


Рис. 6. Матрица ячеек памяти из нанотрубок

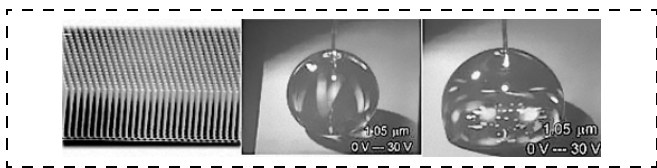


Рис. 7. Нанотрава и электролит — основные составляющие нанобатарейки

ность в механическом усилии для активации, вследствие чего переход в рабочее состояние занимает довольно много времени. Необходимость иметь резервуар для электролита и механизм активации уменьшает полезный объем внутри источника питания.

В основе работы как новой, так и существующих батарей лежит химическая реакция. Нанотехнологии обеспечивают уникальный способ соединения химических компонентов и управления параметрами реакции. На рис. 7 показан пример трубчатой наноструктуры, так называемой "нанотравы". Из нее формируется сверхгидрофобная наноструктурированная поверхность ("Superhydrophobic NanoStructured Surface"), над которой размещается капля электролита. Капелька находится над трубочками, не взаимодействуя с ними. В нужный момент ее можно заставить упасть в пространство точно между трубочками, моментально увеличив площадь поверхности, на которой электролит взаимодействует с материалом батареи, вызывая электрический ток. Падение капельки можно вызвать разными способами, например, импульсом напряжения или радиоизлучения.

Новая технология значительно увеличивает срок хранения батареи — до 15–20 лет. К другим преимуществам относятся высокая скорость активации элемента питания и выход на полную мощность, совместимость с технологическими процессами производства полупроводников, высокая плотность энергии. Батарея легко поддается миниатюризации и может быть изготовлена из материалов широкого спектра. Кроме того, как обещают разработчики, новинка будет очень дешевой при массовом производстве. Другими словами, потенциал батареи mPhase в самых разнообразных областях применения, включая космическую и оборонную отрасли, бытовую и промышленную электронику, средства спасения и здравоохранения, огромен. По крайней мере, так считают аналитики из компании Frost & Sullivan Research, присвоившие проекту престижную награду.

По оценке разработчиков, на выход коммерческого продукта понадобится полтора-два года.

Источник: IXBT: mPhase Technologies представляет нанобатарею (<http://www.ixbt.com/news/hard/index.shtml?news118268id>)

Углеродные нанотрубки в мозговых имплантах

Исследователям из Италии удалось вырастить культуру нервных клеток из гиппокампа головного мозга человека на субстрате из сети уг-

леродных нанотрубок. Также учеными было установлено, что сеть из нанотрубок улучшает передачу нервных импульсов между клетками. Ранее ученым удалось получить разветвленные сети на основе углеродных нанотрубок. На основании моделей разветвлений нанотрубок ученые надеялись когда-то создать сложные нейросети, которые будут изменять свою структуру и будут пригодны для вычислительной техники или помогут при создании искусственного интеллекта.

Но даже самые смелые ученые не могли предположить, что можно создать подобный гибрид из "нейросетевых нанотрубок" и живых нервных клеток (рис. 8). Попытки соединить неживое с живым уже увенчались успехом: интерфейсы кремний—нервная клетка работают в лабораторных условиях и могут передавать сигналы.

"Идея совместить нанотрубки и нейроны пришла нам почти сразу, как только мы увидели сходство в их морфологии", — говорит Лаура Баллерини, одна из исследователей нейросетей. "Отростки нейронов тоже цилиндричны и напоминают по структуре нанотрубки. Известно, что нанотрубки могут быть и проводниками и полупроводниками электричества, поэтому с их помощью можно соединять отдельные нейроны между собой."

Для того чтобы создать нужный субстрат, по морфологии напоминающий нейросеть, ученые взяли многослойные нанотрубки с функциональными пирролидиновыми группами. Эти химические соединения облегчают растворение нанотрубок в органическом растворителе диметилформамиде. Затем они расположили нанотрубки в случайном порядке на стеклянной поверхности и добавили растворитель. Через некоторое время у исследователей была точная аналогия нейросети, только составленная из углеродных нанотрубок.

Как только искусственная нейросеть из нанотрубок была получена в достаточном количестве, ученые расположили на ней нейроны гиппокампальной области головного мозга, причем для проверки нейроны выращивали отдельно на чистой стеклянной поверхности. Команда наблюдала за ростом нейронов в те-

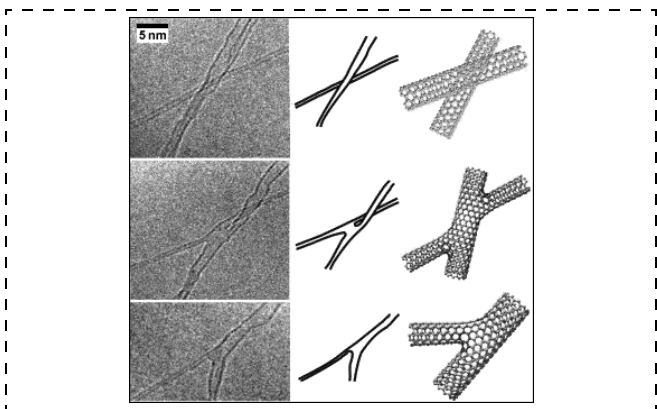


Рис. 8. Нейросеть из нанотрубок (модель)

чение десяти дней. По прошествии этого времени оказалось, что на обоих подложках сформировались почти одинаковые культуры клеток.

За успешным выращиванием нервной ткани последовал период тестов гибрида. Оба образца показали схожие электрофизиологические характеристики: мембранный потенциал, входное сопротивление и емкость. Однако когда дело дошло до измерения постсинаптического тока, то в образце, выросшем на нейросетевых нанотрубках, он распространялся с частотой, в 6 раз большей, чем у культуры, выращенной на простом стекле.

"Нашими исследованиями мы продемонстрировали увеличение скорости распространения нейросигнала благодаря проводящим свойствам субстрата из углеродных нанотрубок", — сказала Баллерини. — "В будущем мы будем исследовать новые стратегии тканевой инженерии на основе различных наносистем и наноматериалов. Одна из наших будущих задач — создать такие нейросетевые импланты, которые позволят соединять поврежденные нейроны между собой для улучшения передачи сигналов между ними".

Как сказали исследователи, суммируя все то, что им удалось узнать, с помощью новой технологии можно будет получить уже в скором времени долговременные импланты головного мозга, улучшающие передачу сигналов. Они будут эффективны при лечении заболеваний спинного мозга, хронических заболеваний головного мозга. Также ученые предлагают вводить микроэлектроды в нейросетевую субстрат нанотрубок для миостимуляции поврежденных участков.

Нанотехнологии приносят богатые плоды даже с одного дерева. По сути дела, углеродные нанотрубки — только одна из миллиардов возможных наноструктур, и мы уже сейчас можем видеть, насколько широко используются их возможности: это и нанотранзисторы, и NED телевизоры, и космический лифт. Теперь к обширному списку применения нанотрубок прибавились импланты мозга.

Источник: Nanotechweb.org: Carbo nanotubes head for brain repair (<http://www.nanotechweb.org/articles/news/4/5/14/1/>)

НЭМС для взвешивания ДНК

Ученые из Корнелльского университета создали НЭМС-детектор, который может взвесить отдельную молекулу ДНК. Масса молекулы — около 995000 дальтонов, в то время как масса бактерии — 655 фг. А вирус который удалось взвесить ученым ранее, имеет массу 1,5 фг.

Более того, с помощью нового НЭМС-сенсора ученые могут определить число молекул ДНК, попавших на него.

Как надеются исследователи из Корнелла, новые НЭМС-сенсоры будут использоваться совместно с микрожидкостными системами для генетического анализа коротких фрагментов ДНК, присутствующих в живой клетке. Далее фрагменты ДНК реплицируются, используя технологию, названную PCR-усиле-

ние. Такой быстрый анализ ДНК может быть использован для детектирования маркеров раковых клеток.

Масса молекул белков и ДНК обычно выражается в дальтонах. Дальтон, или атомарный вес, — это масса одного протона или нейтрона. По отношению к другим единицам массы один дальтон — это одна тысячная зептограмма, который, в свою очередь, одна тысячная аттограмма, а он — тысячная фемтограмма. Как мы видим, со времени взвешивания вируса ученые далеко продвинулись в точных измерениях массы.

Ученые надеются, что им удастся взвешивать не только молекулы ДНК, но и отдельные белки, что поможет создать быстродействующие детекторы токсичных веществ. "Детектирование отдельных молекул определенного типа зависит от фундаментальных химических ограничений. Однако созданный нами НЭМС-детектор на несколько порядков точнее современных измерительных приборов", — говорит Гарольд Крэйгхед, глава исследователей из Корнелльского университета. — "Я думаю, что взвешивание отдельных белков поможет при создании эффективного детектора таких заболеваний, как СПИД".

Как и в случае с вирусом, молекула ДНК помещалась на колеблющийся кантилевер, изменялась частота его колебаний, которая регистрировалась и обрабатывалась микропроцессором. Но на этот раз Крэйгхед и его команда сделали целую матрицу кантилеверов. Каждый был от 3 до 5 мкм в длину и 90 нм толщиной. В конце каждого кантилевера находился маленький золотой диск диаметром в 40 нм.

Далее ученые поместили матрицу кантилеверов в раствор, содержащий одинаковые ДНК, состоящие из 1578 пар нуклеотидов. Для экспериментальных целей молекулы были обработаны тиолом, благодаря чему они смогли легко присоединиться к золотым дискам на поверхности кантилеверов. По прошествии некоторого времени на наноустройстве оказался довольно много молекул ДНК, связанных с кантилевером.

Воздействуя на кантилеверы лучом лазера, ученые добились частоты вибрации от 11 до 12 МГц. С помощью другого лазера исследователи измеряли частоту осциллятора в реальном времени. Далее НЭМС-весы были "оттарированы" — учеными установлена зависимость изменения частоты осцилляции от массы молекулы. Так, изменение массы кантилевера на 1 аттограмм приводило к изменению частоты на 50 Гц.

Для того чтобы построить работающий белковый и ДНК-анализатор, необходимо на НЭМС-осцилляторы нанести специальные маркеры, к которым и будут присоединяться взвешиваемые молекулы.

Как утверждает Крэйгхед, теперь дело за тем, чтобы собрать все части детектора в одно устройство, тогда можно будет говорить о действительно мобильных "нановесах".

Источник: Nanotech-Now: From attograms to Daltons: Cornell NEMS device detects the mass of a single DNA molecule (http://www.nanotech-now.com/news.cgi?story_id=09595)

Международная конференция SEMI по МЭМС и МСТ В рамках программы "СЕМИ ЭКСПО СНГ 2005"

Среда, 28 сентября 2005

8:30—18:00

Гостиница "Националь"

Москва, Россия

Председатели: доктор Гесснер, TU Chemnitz и чл.-корр. РАН Ю. Чаплыгин, МИЭТ

Приветствие — *Walter Roessger, Президент SEMI Европа/СНГ*

Главное обращение — *Prof. Thomas Gessner, TU Chemnitz (Prof. Thomas Gessner, University of Technology, Chemnitz)*

Сессия 1: Состояние и направления развития рынка MEMS/MST

- **Состояние и прогноз развития рынка MEMS/MST** — доктор Хеннинг Вихт, Вихт Текнолоджи, Германия (*Dr. Henning Wicht, WTC*)
- **"Производство MEMS: от приборов к рынкам оборудования и материалов"** — Жан Кристоф Элой, Yole Development, Франция (*Jean-Christophe Eloy, Yole Development, France*)
- **Компании-производители MEMS в Германии и других Европейских странах** — "IVAM" Европейская Ассоциация производителей MEMS — *Dr. Christine Neu, CEO IVAM — Microtechnology Network*
- **Потенциал России как развивающегося рынка MEMS/MST** — проф. Петр Мальцев, Главный редактор журнала "Нано- и микросистемная техника"
- **"Государственное финансирование научно-исследовательских работ в области MEMS/MST в России"** — приглашенный спикер: Юрий Козлов, директор, Российское Федеральное агентство по науке и инновациям"
- **Состояние и прогнозы импорта MEMS/MST в Россию** — д-р техн. наук Александр Курляндский, Генеральный директор "Электронинтерг С" и ARDEC (Ассоциация Российских дистрибьютеров электронных компонентов)
- **Программы Европейской Комиссии в области MEMS/MST** — *Gaetan Menozzi, директор, Memscap, France*

Сессия 2: Развитие MEMS/MST в России и СНГ

- **Разработки и производство кремниевых MEMS в России** — д-р техн. наук Александр Сауров, директор технологического центра МИЭТ
- **Разработки MEMS в России и СНГ** — проф. Александр Сигов, МИРЭА
- **Стратегия Инноваций в области MEMS в России** — *Patrick Keating, General Manager < IS Venture Capital*

- **Роль университетов в развитии промышленности по производству MEMS в России** — чл.-корр РАН Юрий Чаплыгин, ректор МИЭТ

Сессия 3: Разработка MEMS/MST, производственные технологии и оборудование для производства MEMS

- **CALLS технологии в процессе разработки и проектирования MEMS/MST** — проф. Юрий Болдырев, Центр по разработке Software Санкт-Петербургского политехнического университета
- **Презентация от фирмы EVG** — фамилия спикера будет сообщена позднее
- **MEMS на основе наноструктур** — д-р техн. наук Виктор Быков, Президент NT-MDT, Зеленоград

Сессия 4: Области применения MEMS (Развитие процесса использования MEMS/MST в России)

- **Разработка микросистем для биомедицинской промышленности в России** — проф. Виктор Лучинин, Центр микросистем, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
- **Разработки двигателей на базе MEMS в Белоруссии** — д-р техн. наук Виктор Курмашов, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
- **Использование микросистем в Российской автомобильной промышленности** — Вячеслав Поздняков, Главный конструктор ОАО Автоэлектроника, г. Калуга
- **Разработки MEMS/MST для применения в области авионики/гироскопов в России** — доктор Ирина Попова, фирма Гирооптика, Санкт-Петербург
- **Значение для Российской (СНГ) MEMS/MST промышленности создания своей ассоциации/гильдии** — *Взгляд со стороны — Torsten Thieme, Memsfab, Germany*

Открытая дискуссия: Коммерциализация MEMS/NEMS/MST

Заключительное слово — *Walter Roessger, Президент SEMI Europe/CIS*

Федеральное агентство по науке и инновациям
Российская Академия наук
Министерство науки и образования РФ
Научный совет РАН по робототехнике и мехатронике
Институт проблем механики РАН

Международная программа по перспективной робототехнике МППР

Международная конференция

АДАПТИВНЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ РОБОТЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

24—26 ноября, 2005 г.,
Москва, Россия

Почетные председатели

Игорь Макаров	академик, Председатель Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике, Россия
Сергей Мазуренко	Руководитель Федерального агентства по науке и инновациям
Норман Каплан	Президент МППР, США
Жорж Жираль	Генеральный секретарь МППР, Франция

Организационный комитет

Сопредседатели:

Ф. Черноусько	академик РАН
В. Градецкий	ИПМ РАН

Члены:

М. Ананян	Институт нанотехнологий
А. Ющенко	МГТУ им. Н. Э. Баумана
Е. Юревич	ЦНИИ РТК
И. Каляев	Институт мультипроцессорных систем, Таганрог
Д. Климов	ИПМ РАН
В. Лопота	ЦНИИ РТК
В. Лохин	МИРЭА
П. Мальцев	Журнал "Нано- и микросистемная техника"
Д. Охоцимский	Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

Ю. Подураев	МГТУ "Станкин"
В. Раковский	Антех
А. Синев	ИМАШ им. А. А. Благонравова
В. Степанов	МНТК "Робот"
В. Прянишников	НП "Мобильные роботы"
В. Павловский	МГУ им. М. В. Ломоносова
А. Батанов	МГТУ им. Н. Э. Баумана
М. Рачков	МГИУ

Цель конференции

На конференции будут обсуждаться наиболее важные результаты в области науки и технологии развития адаптивных и интеллектуальных роботов и систем. Современное состояние и тенденции исследований и применений в области робототехнических систем с возможностями адаптации и искусственного интеллекта являются предметом докладов.

Настоящее и будущее адаптивных и интеллектуальных манипуляционных и мобильных роботов является предметом обсуждения на конференции: "В мир роботизированных машин с искусственным интеллектом".

Тематика

Тематика докладов включает, но не ограничивается, следующим:

- методы адаптации и искусственного интеллекта в мобильной и промышленной робототехнике;
- процедура принятия решений в робототехнике;
- интеграция механических, электрических, электронных, информационных связей в интеллектуальных мехатронных системах;
- интеллектуальные и адаптивные микророботы и микросистемы;
- датчики и системы датчиков;
- системы объемного технического зрения;
- интеллектуальные алгоритмы;
- интерфейсы пользователя в мире искусственного интеллекта;
- моделирование и методы виртуальной реальности;
- адаптивные и интеллектуальные роботы, их существующие и потенциальные применения в промышленности, медицине и биоинженерии, гуманитарном разминировании, атомных станциях и энергетике, экстремальных и рискованных ситуациях;
- микророботы и поведение с искусственным интеллектом.

Международный программный комитет

М. Армада	(Испания)
И. Бодуан	(Бельгия)
В. Градецкий	(Россия)
Л. Хсю	(Бразилия)
Ф. Черноусько	(Россия): Председатель
Д. Климов	(Россия)
С. Лакруа	(Франция)
Ц. Ли	(Корея)
Дж. Мускато	(Италия)
К. Тани	(Япония)
Ж. Г. Риззотто	(Италия)
М. Скибневский	(США)
В. Фридрих	(Новая Зеландия)
К. Морикони	(Италия)
П. Копачек	(Австрия)
Г. Вирк	(Англия)
М. Вукобратович	(Сербия)

Информационные спонсоры

Конференция информационно поддерживается Австрией, Бельгией, Францией, Италией, Японией, Россией.

Члены МППР

Австралия	П. Корк
Австрия	П. Копачек
Бельгия	И. Бодуан
Бразилия	Л. Хсю
Канада	Е. Дюпуи
Китай	К. Дай
Европейская Комиссия	П. Карп, Т. Скордаш
Франция	Ж. Жираль
Германия	Р. Дилманн
Италия	К. Морикони
Япония	К. Тани
Корея	Ц. Ли
Новая Зеландия	В. Фридрих
Россия	В. Градецкий
Испания	М. Армада
Англия	Ж. Пегман
США	Е. Марш

ПРЕДСТАВЛЯЕМ КНИГИ

П. Харрис. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века. — М.: Техносфера, 2003. 336 с.

Первая монография по углеродным нанотрубам. Книга будет интересна химикам, физикам, материаловедом и инженерам, работающим с углеродными материалами, фуллеренами и непосредственно связанными с ними структурами, такими как углеродные наночастицы и неуглеродные фуллерены.

Книга, написанная в ясной и сжатой форме с представлением богатого иллюстративного материала, является прекрасным введением в новый мир нанотрубных структур.

Рассмотрены методы приготовления, механизмы роста, технология и физика структур; нанокапсулы и трубы-нанотесты; механические свойства углеродных нанотруб; искривленные кристаллы, неорганические фуллерены и наностержни; углеродные луковичи и сфероидальный углерод; перспективные направления исследований в данной области.

В. Г. Пантелеев, О. В. Егорова, Е. И. Клыкова. Компьютерная микроскопия. — М.: Техносфера, 2005. 304 с.

С появлением микроскопа открылась возможность увидеть "невидимое", а с появлением видеокамер и компьютера — зафиксировать полученные данные и проанализировать их в целях получения объективной количественной информации. В результате соединения этих составляющих был разработан новый прибор — анализатор изображений.

За последние 10 лет анализаторы изображений получили широкое распространение в биологии и медицине, электронике, материаловедении и производстве.

В книге рассказывается, что такое современный анализатор изображения на базе светового микроскопа. Это пример наиболее сложной и интересной системы с точки зрения разработки и разнообразия использования.

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

Первое учебное пособие на русском языке, охватывающее всю область принципиально новых приборов для изучения поверхности твердых тел и наноструктур — от туннельных до атомно-силовых и магнитно-силовых микроскопов. Подробно описаны применяемые конструкции и схемные решения аппаратуры, особенности применения.

Для студентов и преподавателей физических, приборостроительных и материаловедческих специальностей.

Ч. Пул, Ф. Оуэнс. Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2004. — 328 с.

Первое руководство на русском языке, описывающее структуру и свойства наноматериалов от твердотельных до биологических объектов. Исчерпывающе изложены технологии изготовления и методы исследования наноструктур, разнообразные применения — от оптоэлектроники до катализа и биотехнологий.

Учебник-монография адресован широкому кругу научных работников, инженеров-электронщиков, специалистов в областях химических и биотехнологий.

Заказать книги можно по почте: 125319, Москва, а/я 594

CONTENTS

Maltsev P. P. *Terminology of MEMS/MST and NEMS/NST in Russia* 2

Perspectives terminology of MEMS/MST and NEMS/NST developed.

Verner V. D. *To Terminology in Microsystems Technology* 6

Terminology in field of Microsystems Technology (Technique) subject to existing definitions as techniques, connected with miniaturization of elements size micrometers diapason is presented.

Varshavski A. E. *Coefficient of Science Development in Russia* 8

Perspectives of Science use, which is the most rapid developed global scientific-technical direction are considered.

Strelchuk V. V., Valakh M. Ya., Gule E. G., Kolomys A. F., Lisitsa M. P., Mazur Yu. I., Wang Z. M. and Salamo G. J. *Modification of Properties of (In, Ga)As/GaAs Multilayer Nanostructures with Quantum Wires by Using Thermal Annealing* 10

Optical investigations of 17-period $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ structures with quantum wires (QWRs) have been performed after rapid thermal annealing (RTA) at the temperatures 550 to 850 °C for 30 s. It has been shown that RTA results in the high-energy shift of photoluminescence (PL) band peaks inherent to (In, Ga)As QWRs and 2D (In, Ga)As layer, which is caused by changes of their component composition and strain values as a consequence of In/Ga atomic interdiffusion processes. The change of the activation energy describing the thermal decay of (In, Ga)As QW PL band in the annealed samples in the dependency on the annealing temperature have been explained by the change of the quantum-dimensional potential in the result of interdiffusion. The high-energy shift of (In, Ga)As QWRs PL peak with increasing the excitation intensity is indicative of the presence of piezoelectric field within QWRs. We found a strong optical anisotropy of PL spectra, which is a result of QWRs shape anisotropy as well as anisotropy of strain relaxation. It has been shown that RTA of (In, Ga)As multilayer structures with QWRs can be used to improve size homogeneity of QWRs, increase the degree of linear polarization and change the emission energy.

Levonyan L. V. *X-ray Phase Contrast Forming under the Conditions of Spherical-Wave Diffraction Focusing* 18

The possibility of reconstructing the inner structure of one-dimensional phase objects under the conditions of X-ray spherical-wave diffraction focusing is discussed. Strong-absorbing wedge-like crystal with rib parallel to diffraction vector in symmetrical Laue geometry is used as a monocrystal-analyzer. Displacing the phase object along the direction of diffraction vector with smaller steps than the

sizes of the focus are one can bring different parts of phase object into the focusing conditions. Registrating the whole data map one can reconstruct wave phase shift obtained in phase object.

Kartashev V. A., Buruhina T. F. *Dependence of Tip Displacements on STM Axis Inclination* 21

Dependence of tip displacements on STM axis inclination is under investigation. This dependence is caused by elasticity of STM structure. Experiments show that results of calculations explain correctly observed dependence.

Buchin E. Yu., Denisenko Yu. I. *The Use of Thermomigration Processing in MEMS Technology* 29

The technical approaches with the use of thermomigration processing in MEMS technology are presented. The specific examples of using the process as applied to silicon micromachining, $p-n$ junction isolation, electrical commutation and monolithical assembling of silicon parts are described.

Lamanov A. M., Ibragimov R. M., Nikolski K. N., Redkin A. N., Tchesov R. G., Sheshin E. P. *Field Emission Cathodes Prepared by Low Temperature Chemical Vapor Deposition Method from Ethanol Vapor* 34

At this paper investigation results of emission properties carbon nanotubes cathodes are represented. These cathodes were produced by low temperature chemical vapor deposition method (temperature 500 °C) from ethanol vapor, that allowed to use a glass as a cathode substrate. Investigated samples differ by geometry of deposited layer of the carbon nanotubes: with complete cover and cover with islands of different diameters.

Gradetsky V. G., Knyazkov M. M., Kravchuk L. N., Semenov E. A. *Methods of the Motion for the Miniature Inside-Tube Control Robots* 37

The results of the status and evolution of miniature control multilink robot motion inside of small diameter tubes are presented. The most perspective schemes technical solutions and control motion realizations are considered for miniature inside tube robots, developed on the base of computer simulation and physical modeling.

The advanced tendencies in R & D and miniature robot applications are important for problem solving in the area of automation technology.

This work realized in the frame of Russian Found for Basic Research (RFBR) and was supported partially by the Programme 16 of RAS "The problems of analyzes and synthesis of integrated technological and social control system".

For foreign subscribers:

Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(095) 684-5008. Fax: +7(095) 681-3798

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(095) 269-5510.

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

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4/1. Телефон редакции журнала (095) 269-5510. E-mail: it@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 И.С. Павлова. Корректор Е. В. Комиссарова

Сдано в набор 01.07.2005. Подписано в печать 03.08.2005. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,20. Заказ 1312. Цена договорная

Отпечатано в Подольской типографии — филиал ОАО "ЧПК", 142110, г. Подольск, ул. Кирова, 15