

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 621.3.049.77

А. В. Путилов, д-р техн. наук, проф.,
Минпромнауки России

О РАЗВИТИИ РАБОТ В РОССИИ В ОБЛАСТИ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Изложены материалы по состоянию и развитию нанотехнологий и созданию наноматериалов в Российской Федерации.

В "Основах политики Российской Федерации в области развития науки и технологий на период до 2010 года и дальнейшую перспективу", утвержденных Президентом Российской Федерации В. В. Путиным в марте 2002 года, было особо подчеркнуто, что в современных условиях достижения науки и технологий стали определять динамику экономического роста, уровень конкурентоспособности государств в мировом сообществе, степень обеспечения их национальной безопасности и равноправной интеграции в мировую экономику. В последнее время одной из наиболее динамично развивающихся областей знания стала сфера изучения наноразмерных объектов и систем (нано- приставка от определения нанометра 10^{-9} м), которые при этом проявляют принципиально новые свойства и обладают огромным потенциалом в будущем развитии реального сектора экономики. Разработанный проект концепции инновационного развития результатов в области исследований и разработок наноматериалов и нанотехнологий направлен на ускорение реализации отечественных достижений на практике.

В России в рамках федеральных целевых программ, госзаказчиком в которых выступает Минпромнауки России, успешно развивается целый ряд направлений разработки нанотехнологий, исследования наноструктур, создания наноматериалов. Особо важное место в исследованиях и разработках в области наноматериалов и нанотехнологий занимают институты РАН, работающие в рамках академических программ "Низкоразмерные квантовые структуры", "Наноматериалы и супрамолекулярные системы" и др. Оценкой глубины отечественного научного задела стало присуждение Нобелевской премии академику Ж. И. Алфе-

рову. Организации Минатома России также активно проводят работы в области ультрадисперсных (нано-) материалов в соответствии с отраслевой целевой программой "Ультрадисперсные (нано-) материалы и нанотехнологии". Минобразования России поддерживает исследования наносистем в ряде ведущих ВУЗов; Минобороны России поддерживает исследования в области нанотехнологий оборонной направленности.

В рамках ФЦНТП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники" на 2002—2006 гг. проводятся работы, имеющие непосредственное отношение к совершенствованию элементной базы микро- и наноэлектроники, развиваются на базе представлений о наносистемах разделы: "Физика твердотельных наноструктур"; "Физика твердого тела"; "Современные проблемы науки о поверхности"; "Фуллерены и нанотрубки"; "Технологии живых систем"; "Новые материалы" и др. Ряд важных исследований осуществляется в рамках ФЦП "Национальная технологическая база".

Среди важнейших отечественных достижений в области наноматериалов и нанотехнологий, выполняемых научными, образовательными и научно-технологическими организациями России, можно выделить следующие.

◆ ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН совместно с другими академическими институтами проводит интенсивные исследования по созданию новых приборов наноэлектроники в диапазоне минимальных размеров элементов 5—0,5 нм и методов их массового производства. Реальное применение структуры с квантовыми точками уже получили в полупроводниковых гетероструктурных лазерах. В этой области российскими учеными получены новые крупные результаты. Так, в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, ИФП СО РАН, Физическом институте им. Н. П. Лебедева РАН, ИРЭ РАН, МИРЭА, МИЭТ и др. развиты технологии получения гетероструктур на различных материалах, созданы гетероструктурные приборы с уникальными свойствами — полупроводниковые лазеры, гетероструктурные фотоприемники, гетероструктурные сверхскоростные транзисторы с двухмерным электронным газом в канале, созданы образцы одноэлектронных транзисторов, работающие при комнатной температуре (МГУ им. М. В. Ломоносова, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, ИРЭ РАН, ИФП СО РАН).

◆ Принципиальным результатом, достигнутым в отечественном научно-техническом комплексе, стало создание нанотехнологических приборов и установок: были развиты основы микро-механики и разработаны сканирующие зондовые, туннельные и атомно-силовые микроскопы (фирма НТ-МДТ, ГНЦ ГНИИ Физических проблем им. Ф. В. Лукина), что обеспечило сильный импульс к развитию целого ряда направлений прорывного характера.

◆ В ИФМ РАН, МГУ им. М. В. Ломоносова развиты научные основы диагностики наноструктур, сделан крупный научный задел в области металлической наноэлектроники (ИПТМ РАН, Институт физики металлов УРО РАН). Все это было достигнуто во многом благодаря разработке и серийному производству отечественных конкурентоспособных многокамерных установок молекулярно-пучковой эпитаксии в ИФП СО РАН, НИТИ (г. Рязань). РосМЦ (г. Томск) совместно с ИФПМ СО РАН разработаны технологии нанокристаллических титановых имплантантов и особостойких наноструктурных покрытий для изделий общемашиностроительного применения.

◆ Отечественные ученые создали собственные теоретические и экспериментальные заделы в области твердотельных элементов квантовых компьютеров (ФТИ РАН, ИФТТ РАН), квантовой связи, квантовой криптографии. Технологии атомного масштаба (0,5–0,1 нм) открывают абсолютно новые перспективы в этой сфере.

◆ В ГНЦ РНЦ "Курчатовский институт" проводятся исследования и разработки с целью получения устройств с размерами элементов нанометрового диапазона на основе альтернативной технологии по сравнению с оптической литографией, на основе открытого явления "селективного удаления атомов" разработаны основы оригинальной технологии изготовления наноустройств.

◆ В Институте кристаллографии РАН созданы устройства для использования синхротронного излучения при исследовании свойств и структуры объектов нанотехнологии различными методами, разрабатываются компьютерные методы моделирования интерпретации экспериментальных данных, а также аппаратные средства для получения кристаллов белков и двумерных кристаллических белковых структур, включая решение задач нанодиагностики характерных нанообъектов.

◆ В Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН разрабатываются новые методы получения наноматериалов: синтез и компактирование ультрадисперсных порошков, получение наноматериалов методами интенсивной пластической деформации, кристаллизация из аморфного состояния, пленочная нанотехнология. Институт химии силикатов им. И. В. Гребеншико-

ва РАН интенсивно проводит материаловедческие работы в области "интеллектуальных материалов", ультрадисперсного состояния и супрамолекулярной химии, коллоидных систем, а также разрабатывает теоретические принципы строения частиц с наноразмерами, учитывающие размер как физико-химический фактор.

◆ В ряде государственных научных центров Российской Федерации (ЦНИИчермет им. И. П. Бардина, "Гиредмет", ВНИИНМ им. А. А. Бочвара, НИФХИ им. Л. Я. Карпова и др.) ведутся работы по получению и исследованиям свойств в нанокристаллических гибридных композитах, выявлению количественных критериев последовательного превращения металлических сплавов в аморфное и нанокристаллическое состояние; разработан уникальный способ получения нанокристаллического бериллия и алюминия с размерами структурных элементов около 100 нм.

◆ В области медицины, генетики и экологии также велись исследования и разработки наносистем (ИМБ РАН, ГНЦ ГНИИ "Генетика" и др.). Созданы образцы так называемых "биочипов", разработаны технологии выделения мономолекулярных кристаллических упорядоченных белковых структур бактериального происхождения и их использования в нанотехнологиях в областях микроэлектроники, микро- и наномеханических устройств, биосенсоров, биотехнологии.

Результаты анализа свидетельствуют, что отечественные разработки находятся на уровне мировых достижений и нуждаются в особой поддержке, включая выделение отдельной бюджетной строки субвенций (на 2004 бюджетный год), так как программный принцип (ФЦНТП, ФЦП) государственной поддержки не в полной мере позволяет стимулировать быстроразвивающиеся области науки о наносистемах.

Россия в настоящее время располагает достаточным научно-технологическим заделом и кадровым потенциалом для целенаправленного инновационного использования результатов научных исследований в области наноматериалов и нанотехнологий, являющихся основой высоких технологий будущего. Этот вывод базируется также на известных интеллектуальных конкурентных преимуществах России и уже сделанных в прошлые годы крупных инвестиционных вложениях в создание специального исследовательского оборудования, приборостроения и инструментария. В ряде случаев это исследовательское оснащение позволяет решать и технологические задачи.

К таким инструментам, ориентированным на решение конкретных задач в области наноматериалов, микро- и наноэлектроники, нанотехнологий, можно отнести источники синхротронного излучения (в Москве и Новосибирске, завершается

строительство в Зеленограде), развитую сканирующую туннельную спектроскопию, зондовые микроскопы высокой разрешающей способности, атомно-силовую микроскопию, микромеханику на основе кремниевых систем и другие методы, используемые в том числе, в качестве инструментария развития нанотехнологий.

Специализированный источник синхротронного излучения в РНЦ "Курчатовский институт" располагает экспериментальными станциями для проведения работ в области белковой кристаллографии, прецизионной рентгеновской оптики, рентгеновской кристаллографии и физического материаловедения, топографии, микрополиграфии и других применяемых рентгеновских методов исследований, на которых решается широкий спектр научно-технологических проблем.

Электронная литография пока еще — лабораторная технология, но развиваясь в направлении оптической литографии в области экстремального ультрафиолета или мягкого рентгена, может уже через несколько лет стать промышленной технологией. Прецизионный электронный литограф, вакуумный туннельный и атомно-силовой микроскопы, установка атомно-слоевой эпитаксии, одноионный имплантер будут использоваться для создания твердотельных элементов квантовых компьютеров, квантовой связи и квантовой криптографии. Молекулярно-пучковая эпитаксия может стать основой для выращивания полупроводниковых наногетероструктур. Метод магнито- и гетероядерной спектроскопии ЯМР может быть использован для изучения структуры и внутримолекулярного движения атомов и геной инженерии. Создана уникальная зондовая установка для проведения локальных химических процессов получения наноструктур из особо чистых элементо-органических соединений (на ней проводятся работы по изготовлению базовых наноизделий для наноэлектронных и нанооптических приборов).

Разработаны измерительные голографические дифракционные решетки в нанодиапазоне чувствительности измерительных систем, не имеющих аналогов за рубежом. В 2001 г. Госстандарт России ввел в государственный реестр голографические субмикрометры как новый тип "длинномеров" голографических ДГ-30, ДГ-100, ДГ-200 и выдал сертификат об утверждении типа средств измерений.

Все перечисленные и другие имеющиеся эффективные методы исследований и инструментарий для получения наноструктурных материалов, покрытий и нанотехнологий, включая серьезные заделы по приборостроению, метрологическому обеспечению и нанодиагностике, являются основной технологической базой проведения полномасштабных исследований и разработок.

Многое специальное оборудование и инструменты исследования наносистем находятся в ведении научных организаций различных министерств и ведомств, которые проводят исследования по своим ведомственным программам. Вместе с тем, особенностью наносистем является их междисциплинарный характер не только в сфере широкого промышленного использования научных результатов, но самое главное в том, что исследования проводятся на стыке таких разделов наук как физика, химия, квантовая механика, оптика, электроника, информатика, генетика, биология и медицина. Координация со стороны Минпромнауки России исследований и разработок в этой сфере может существенно ускорить получение практически значимых результатов.

Взаимное проникновение и обмен результатами различных методов исследований, инструментарием и технологическими приемами позволит интегрировать действия и усилия научных коллективов и располагаемого отечественного научно-технологического задела и потенциала для развития в России высокотехнологичных отраслей экономики и производства конкурентоспособной наукоемкой продукции и услуг.

Организационно такая задача может быть решена согласованием действий заинтересованных министерств и ведомств путем образования центров коллективного пользования (ЦКП) и оснащения их специализированным исследовательским и приборным оборудованием, в том числе и технологическим. Эти ЦКП целесообразно создавать на базе действующих в различных организациях подразделений, имеющих квалифицированный персонал и соответствующее оборудование. Они могли бы в дальнейшем разрабатывать и развивать отечественное специальное исследовательское и инструментальное оборудование под решение конкретных задач. Аналогичные подходы могли бы быть реализованы на базе действующих или создаваемых технопарков и инновационно-технологических центров соответствующей научно-технологической специализации. Одновременно ЦКП совместно с образовательными учреждениями Минобразования России могут решать задачи по материальному обеспечению подготовки и переподготовки кадров специалистов высшей квалификации, практических занятий студентов и аспирантов.

Минпромнауки России осуществляет с Европейским союзом (ЕС) деятельность по совместной поддержке приоритетных разработок, среди приоритетов выделяется сфера нанотехнологий. В 2003 г. планировалось провести согласование с ЕС механизмов и порядка финансирования российских участников таких совместных проектов. Кроме того, представляется целесообразным в те-

чение 2003 г. провести инвентаризацию полученных результатов научно-технологической деятельности в области наноматериалов и нанотехнологий, определить перечень наиболее готовых к практической реализации разработок и наметить первоочередные меры по формированию механизмов их продвижения в отечественную промышленность, что в условиях назревающей технологической революции позволит создать базис для реализации научно-технологических приоритетов России в XXI веке и сформировать рынки конкурентоспособной наукоемкой продукции новых поколений.

Для осуществления координации работ по наносистемам, выполняемых различными министерствами и ведомствами, крупными научными коллективами, необходимо сформировать Научно-координационный совет "Наноматериалы, нанотехнологии и основы nanoиндустрии", который будет осуществлять межведомственную координацию работ в области развития наноматериалов и нанотехнологий как основы формирования новых технологических укладов в хозяйствующих субъектах реального сектора экономики по рассматриваемой проблеме.

УДК 535:621.375.826

К. А. Атласов, В. П. Вейко, д-р техн. наук,
А. И. Калачев, канд. техн. наук,
Л. Н. Капорский, канд. физ.-мат. наук,
Санкт-Петербургский Государственный
институт точной механики и оптики
(технический университет)

ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ БЛИЖНЕПОЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЗОНДОВ*

Новые возможности в микро- и нанoeлектронике открывает применение приборов сканирующей зондовой микроскопии и микроскопии ближнего поля. Основным инструментом является зонд (например, заостренное оптоволокно) с размерами вершины ~100 нм. Проведены исследования лазерной технологии формирования зондов, направленные на изучение параметров процесса изготовления зондов, отвечающих за их качество, некоторые технические характеристики и воспроизводимость.

Введение

Ближнепольные оптические устройства все более и более становятся обычным инструментом не только в исследовательских лабораториях институтов и научных центров, но также и на высокотехнологичных предприятиях. Такие устройства все чаще применяются в качестве измерительных приборов и в виде технологического оборудования для формирования микро- и наноструктур. Техника сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ) широко применяется в таких разных областях, как биология, химия, микроэлектроника и др. При биомедицинских и химических

исследованиях ведется изучение микрообъектов и одиночных молекул *in vivo*, используется СБОМ и для реализации точных химических сенсоров. В микроэлектронике техника СБОМ применяется при исследовании полупроводниковых структур субмикронных размеров, границ раздела в полупроводниках, возбуждения фототока с последующим анализом характеристик полупроводниковых структур методами спектроскопии [1], а также в задачах нанесения рельефа с размерами элементов 10–100 нм в нанолитографии на фоторезистивных пленках, фоточувствительных полимерах, ферроэлектрических поверхностях [2–5] и т. д. Делаются также попытки производства интегральных микросхем. На сегодняшний день эта техника далеко не совершенна и встречается со многими трудностями, наиболее важной из которых является проблема интерпретации получаемых ближнепольных изображений. Эта проблема обусловлена в первую очередь невозможностью априорного определения размера и формы апертуры, которой обладает ближнепольный оптический зонд (БОЗ). Поэтому дальнейшее развитие и распространение ближнепольной техники требует постановки и решения следующих первоочередных задач:

- повышение воспроизводимости характеристик БОЗ в процессе их изготовления;
- развитие методов контроля характеристик БОЗ в процессе их изготовления;
- разработка методов контроля и тестирования зондов, которые позволили бы получать информацию об их оптических свойствах.

Разрешение в СБОМ и его эффективность определяются главным образом характеристиками БОЗ, используемого в ближнепольном эксперименте. В данной статье рассматривается процесс изготовления БОЗ на основе вытяжки из оптического волокна с лазерным нагревом. Для того чтобы выполнить вытяжку зондов с заданными харак-

*Работа выполнена в рамках проекта подпрограммы "Электроника". Код 208.06.01.091.

чение 2003 г. провести инвентаризацию полученных результатов научно-технологической деятельности в области наноматериалов и нанотехнологий, определить перечень наиболее готовых к практической реализации разработок и наметить первоочередные меры по формированию механизмов их продвижения в отечественную промышленность, что в условиях назревающей технологической революции позволит создать базис для реализации научно-технологических приоритетов России в XXI веке и сформировать рынки конкурентоспособной наукоемкой продукции новых поколений.

Для осуществления координации работ по наносистемам, выполняемых различными министерствами и ведомствами, крупными научными коллективами, необходимо сформировать Научно-координационный совет "Наноматериалы, нанотехнологии и основы наноиндустрии", который будет осуществлять межведомственную координацию работ в области развития наноматериалов и нанотехнологий как основы формирования новых технологических укладов в хозяйствующих субъектах реального сектора экономики по рассматриваемой проблеме.

УДК 535:621.375.826

К. А. Атласов, В. П. Вейко, д-р техн. наук,
А. И. Калачев, канд. техн. наук,
Л. Н. Капорский, канд. физ.-мат. наук,
Санкт-Петербургский Государственный
институт точной механики и оптики
(технический университет)

ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ БЛИЖНЕПОЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЗОНДОВ*

Новые возможности в микро- и нанозлектронике открывает применение приборов сканирующей зондовой микроскопии и микроскопии ближнего поля. Основным инструментом является зонд (например, заостренное оптоволокно) с размерами вершины ~100 нм. Проведены исследования лазерной технологии формирования зондов, направленные на изучение параметров процесса изготовления зондов, отвечающих за их качество, некоторые технические характеристики и воспроизводимость.

Введение

Ближнепольные оптические устройства все более и более становятся обычным инструментом не только в исследовательских лабораториях институтов и научных центров, но также и на высокотехнологичных предприятиях. Такие устройства все чаще применяются в качестве измерительных приборов и в виде технологического оборудования для формирования микро- и наноструктур. Техника сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ) широко применяется в таких разных областях, как биология, химия, микроэлектроника и др. При биомедицинских и химических

исследованиях ведется изучение микрообъектов и одиночных молекул *in vivo*, используется СБОМ и для реализации точных химических сенсоров. В микроэлектронике техника СБОМ применяется при исследовании полупроводниковых структур субмикронных размеров, границ раздела в полупроводниках, возбуждения фототока с последующим анализом характеристик полупроводниковых структур методами спектроскопии [1], а также в задачах нанесения рельефа с размерами элементов 10–100 нм в нанолитографии на фоторезистивных пленках, фоточувствительных полимерах, ферроэлектрических поверхностях [2–5] и т. д. Делаются также попытки производства интегральных микросхем. На сегодняшний день эта техника далеко не совершенна и встречается со многими трудностями, наиболее важной из которых является проблема интерпретации получаемых ближнепольных изображений. Эта проблема обусловлена в первую очередь невозможностью априорного определения размера и формы апертуры, которой обладает ближнепольный оптический зонд (БОЗ). Поэтому дальнейшее развитие и распространение ближнепольной техники требует постановки и решения следующих первоочередных задач:

- повышение воспроизводимости характеристик БОЗ в процессе их изготовления;
- развитие методов контроля характеристик БОЗ в процессе их изготовления;
- разработка методов контроля и тестирования зондов, которые позволили бы получать информацию об их оптических свойствах.

Разрешение в СБОМ и его эффективность определяются главным образом характеристиками БОЗ, используемого в ближнепольном эксперименте. В данной статье рассматривается процесс изготовления БОЗ на основе вытяжки из оптического волокна с лазерным нагревом. Для того чтобы выполнить вытяжку зондов с заданными харак-

*Работа выполнена в рамках проекта подпрограммы "Электроника". Код 208.06.01.091.

теристиками и получить при этом хорошую воспроизводимость результатов, необходимо детально изучить параметры процесса. Для этого проводится исследование процесса по измерению временных параметров вытяжки, изучению основных закономерностей формирования геометрии БОЗ и закономерностей нагрева оптического волокна при вытяжке.

Изучение процесса "лазерной вытяжки" БОЗ

В большинстве случаев БОЗ представляет собой заостренное оптическое волокно с размерами острия при вершине, много меньшими длины волны света (порядка 100 нм). Для изготовления БОЗ в настоящее время применяется один из двух наиболее распространенных методов: химическое травление либо механическая вытяжка разогретого до вязкотекучего состояния локального участка волокна. Для нагрева в методе "лазерной вытяжки" применяется излучение CO_2 -лазера на длине волны 10,6 мкм (хорошее поглощение в кварце — материале оптоволокна). "Лазерная вытяжка" является наиболее широко используемым методом среди "тепловых". К одному из основных преимуществ этого метода относится высокая производительность. Однако осуществление контроля параметров вытяжки в ходе процесса представляет собой достаточно сложную задачу. Контроль важен для обеспечения высокого качества БОЗ и воспроизводимости. Сложность задачи обусловлена быстротой протекания процесса "лазерной вытяжки".

Для того чтобы осуществить "лазерную вытяжку" БОЗ с заданными характеристиками, а также обеспечить хорошую воспроизводимость, необходимо знать параметры процесса. Основными технологическими параметрами являются удлинение разогретого участка волокна и его температура во времени. Даже небольшие изменения температуры в ходе процесса могут привести к изменениям геометрических характеристик формируемого БОЗ.

Форма БОЗ в значительной степени зависит от симметричности источника тепла, сформированного на поверхности волокна за счет поглощенного лазерного излучения. Таким образом, для процесса "лазерной вытяжки" необходима оптическая схема фокусировки излучения, способная создать равномерную кольцевую засветку локального участка волокна. Такая схема была разработана, экспериментально проверена и описана в работе [6]. Основным элементом является сферическое зеркало, которое обеспечивает создание кольцевого источника тепла на волокне (рис. 1). Механическая часть данной установки содержит двухсто-

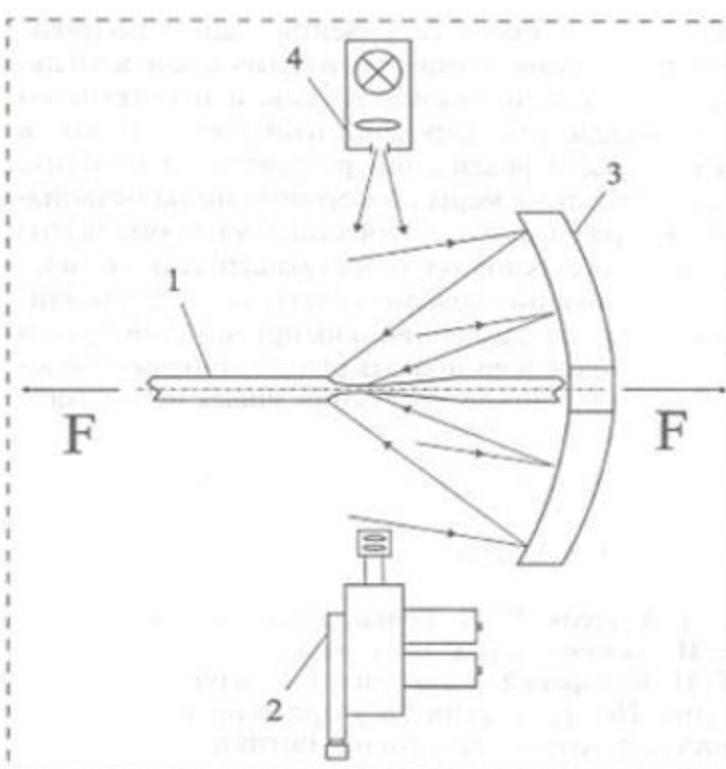


Рис. 1. Оптическая схема для высокоскоростной киносъемки "лазерной вытяжки" БОЗ:

1 — оптоволокно; 2 — высокоскоростная кинокамера СКС-1М; 3 — сферическое зеркало; 4 — осветительная система

ронный растягивающий в горизонтальной плоскости механизм.

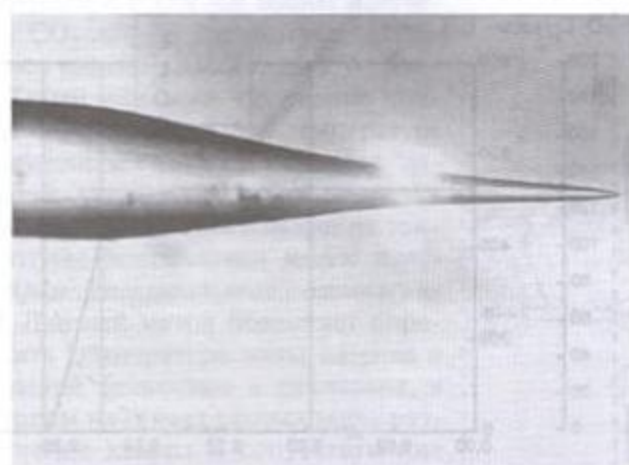
На установке были получены зонды с субмикрометровыми размерами острия на основе одномодового кварцевого волокна (диаметр световедущей жилы 9,5 мкм, диаметр кварцевой оболочки 125 мкм). Фотографии полученных острий БОЗ представлены на рис. 2. В дальнейшем установка была использована как при изучении кинетики "лазерной вытяжки", так и в экспериментах по изучению изменения температуры волокна в процессе.

Высокоскоростная киносъемка

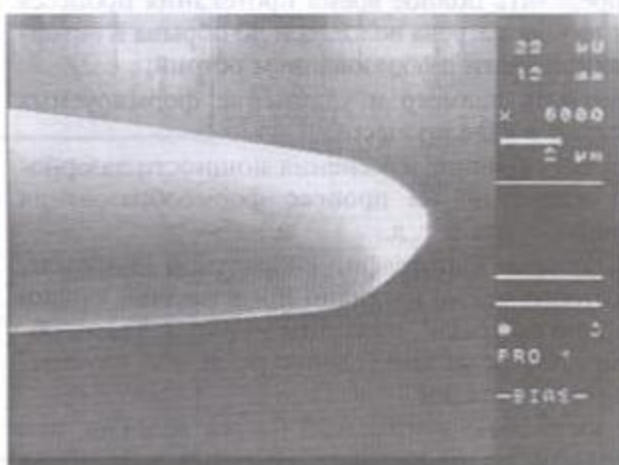
Для киносъемки процесса была использована камера СКС-1М, позволяющая проводить съемку со скоростью 150—4000 кадров в секунду. Для синхронизации киносъемки и начала нагрева волокна применен электромеханический затвор, общий как для осветительной системы, так и для источника лазерного излучения. Съемка проведена с пятикратным увеличением при скорости 600—1000 кадров в секунду.

Скоростная киносъемка позволяет получить некоторые новые знания о процессе "лазерной вытяжки" БОЗ из оптического волокна, а именно:

- пронаблюдать и изучить процесс визуально; выделить основные его стадии (рис. 3);



a)



b)

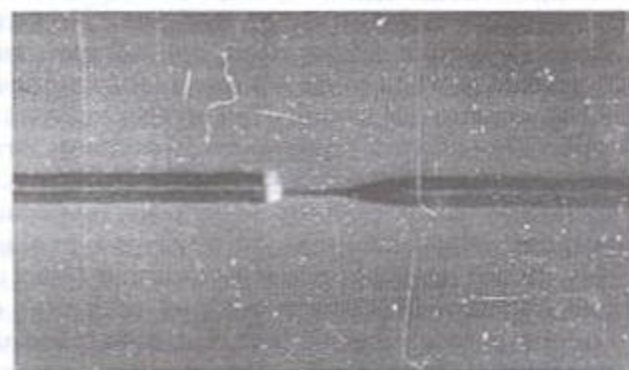
Рис. 2. Фотографии полученных острий БОЗ:

а — с увеличением 200^x; б — с увеличением 6000^x

a)



б)



в)



г)

Рис. 3. Основные стадии "лазерной вытяжки". Кадры получены на основе скоростной киносъемки (5^x; 1000 кадр/с):а — $t = 0,16$ с; б — $t = 0,25$ с; в — $t = 0,26$ с; г — $t = 0,27$ с

- определить полное время протекания процесса от начала нагрева волокна и до обрыва в источенной части с образованием острий;
- измерить диаметр и удлинение формируемых острий в ходе процесса;
- изучить влияние изменения мощности лазерного излучения на процесс формообразования микроострия и т. д.

Некоторые фотографии скоростной киносъемки, которые также наглядно представляют стадии "лазерной вытяжки", показаны на рис. 3. Таким образом, процесс можно условно разделить на четыре основные стадии:

- относительно длительный нагрев волокна, при котором не происходит заметных изменений диаметра (рис. 3, а). Время — от начала отсчета и до момента t — составляет 0,15–0,16 с;
- небольшое плавное утончение разогретой части (рис. 3, б). Время $t = 0,15 \div 0,24$ с;
- быстрое уменьшение диаметра при максимальном разогреве материала волокна в фокусе сферического зеркала, $t = 0,22 \div 0,27$ с (рис. 3, в);
- разрыв с образованием острий (рис. 3, г).

Как видно на фотографиях, показанных на рис. 3, несмотря на двустороннюю "лазерную вытяжку" и фокусировку сферическим зеркалом сформированные после разрыва острия имеют различную геометрическую конфигурацию (по удлинению и углу конусности). Это объясняется следующим образом. В начальный момент времени фокусирующиеся лучи образуют на волокне кольцевую зону нагрева, которая сначала приводит к симметричному утончению диаметра и удлинению в обе стороны при растяжении. Далее по мере утончения волокна формирующееся острие со стороны зеркала (справа) выходит из зоны нагрева (рис. 3) и практически все излучение фокусируется на противоположном острие (слева). Это обуславливает более сильный нагрев острия слева и перераспределение его материала на острие справа, что приводит большему удлинению последнего. Дальнейшее растяжение ведет к тому, что при достижении размера десятка микрон в диаметре тонкой перетяжки сказывается влияние расфокусировки кольцевого источника, а также эффекта рассеяния излучения (поскольку $\lambda = 10,6$ мкм), и температура в тонкой части снижается. Далее следует обрыв с образованием субмикронных острий. Таким образом, несмотря на все очевидные преимущества оптическая схема со сферическим зеркалом не является оптимальной, имея единственный экспериментально выявленный недостаток.

По данным киносъемки была построена зависимость минимального диаметра волокна в зоне нагрева $D(t)$ во времени (рис. 4), а также зависимость размеров длин острий $L_1(t)$ и $L_2(t)$. Длины

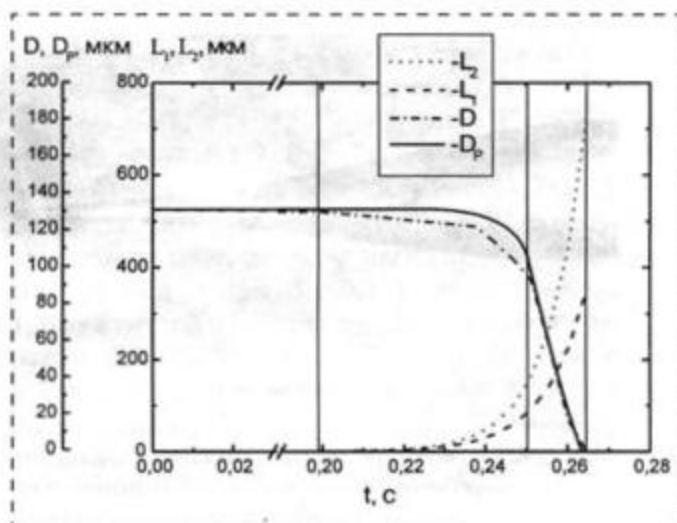


Рис. 4. Зависимости геометрических параметров формируемых острий БОЗ в ходе "лазерной вытяжки"

острий в процессе измерены от точки наименьшего диаметра тонкой перетяжки, соответственно вправо и влево до точки $D = 125$ мкм.

Полученные экспериментальные данные достаточно хорошо подтверждают теоретический анализ процесса "лазерной вытяжки" и математическую модель, основанную на законе вязкого течения Ньютона с учетом зависимости температуры от вязкости. Основные положения модели приведены в работе [7]. На рис. 4 также показана кривая $D_p(t)$, полученная в результате теоретического расчета.

Измерение температуры методом спектрального отношения

Вытяжка острий из кварцевого волокна представляет собой весьма сложный технологический процесс, так как данный материал имеет достаточно высокую температуру размягчения. Несколько выше находится температура, при которой кварц переходит в жидкую фазу и где возможно начало интенсивного испарения. При вытяжке острий необходимо работать в узком температурном интервале, и это составляет некоторые технологические трудности. Если в процессе вытяжки температура волокна опустится ниже температуры размягчения, то это приведет к отвердеванию и сколу острий, окончательный диаметр которых не достиг еще нанометрового размера. В случае, если температура приблизится к температуре испарения и материал перейдет в жидкую фазу, будет сильно сказываться действие сил гравитации на расплавленный объем и вытяжка острий будет протекать с искажением формы. Особенную трудность представляет поддержание нужной температуры с момента, когда диаметр волокна в зоне нагрева становится со-

измеримым с длиной волны излучения CO_2 -лазера и начинают проявляться явления рассеяния [8].

Таким образом, получение точной информации о температуре кварцевого волокна в процессе "лазерной вытяжки" острий является важной задачей. Для измерения температуры использован метод пирометрии спектрального отношения [9]. Данный метод позволяет определить температуру зоны нагрева с большой точностью в диапазоне, в котором начинается происходить размягчение кварца и сопутствующие изменения диаметра волокна при растяжении.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 5. Излучение CO_2 -лазера мощностью 1,2 Вт фокусируется на оптическое волокно 2 с помощью сферического зеркала 1, создавая на поверхности волокна кольцевой тепловой источник. Нагрев волокна сопровождается интенсивным испусканием теплового излучения. Часть этого излучения собирается с помощью оптических световодов 3. Далее "вырезаются" две полосы, соответствующие двум определенным длинам волн. Это сделано с помощью интерференционного светофильтра 4, $\lambda_1 = 1,06$ мкм, (совместно с оптическим светофильтром ИКС-7) и интерференционного светофильтра 5, $\lambda_2 = 0,69$ мкм (совместно с СЗС-25). Интенсивность этих полос измеряется с помощью фотоприемников 6 (ФД-24к). Сигнал от фотоприемников проходит через усилитель 7 и фиксируется на запоминающем осциллографе 8.

В основу работы пирометров спектрального отношения заложен тот факт, что при увеличении температуры тела максимум испускаемого им теплового излучения смещается в сторону малых длин волн. Таким образом, соотношение интенсивностей при двух длинах волн будет определенным образом изменяться в зависимости от температуры.

В пирометрии спектрального отношения измеряется соотношение потоков монохроматического излучения в двух участках спектра, которым сопоставляется так называемая цветовая температура. Далее переход от цветовой температуры T_c к истинной T_0 осуществляется по известному соотношению [10]

$$\frac{1}{T_0} = \frac{1}{T_c} + \frac{\lg \varepsilon_1 / \varepsilon_2}{C_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)},$$

где λ_1 и λ_2 — длины волн, на которых проводятся измерения спектрального отношения; ε_1 и ε_2 —

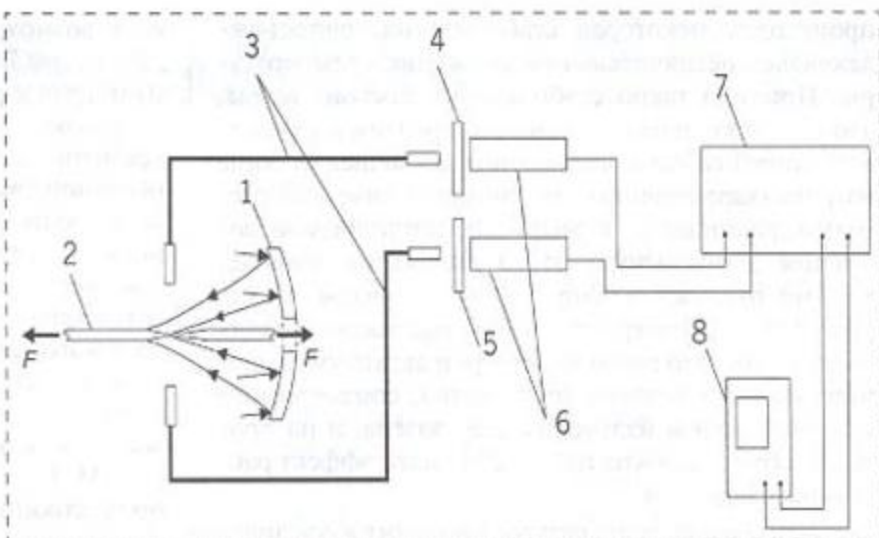


Рис. 5. Зависимости геометрических параметров формируемых острий БОЗ в ходе "лазерной вытяжки"

спектральные коэффициенты серости для этих длин волн; $C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ м · К.

В результате эксперимента была получена зависимость температуры волокна от времени в ходе "лазерной вытяжки" острий БОЗ (рис. 6). График построен исходя из того факта, что кварц можно считать "серым" телом, для которого наблюдается постоянство излучательной способности по спектру (т. е. $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$) и, следовательно, его цветовая температура равна термодинамической.

На диаграмме показан процесс вытяжки, длительность которого составила 0,19 с. Это хорошо согласуется с данными скоростной киносъемки, полученными при схожих условиях эксперимента.

Как видно из графика на рис. 6, в начале вытяжки температура волокна в зоне нагрева начинает резко расти, достигая порядка 2500 К. Далее

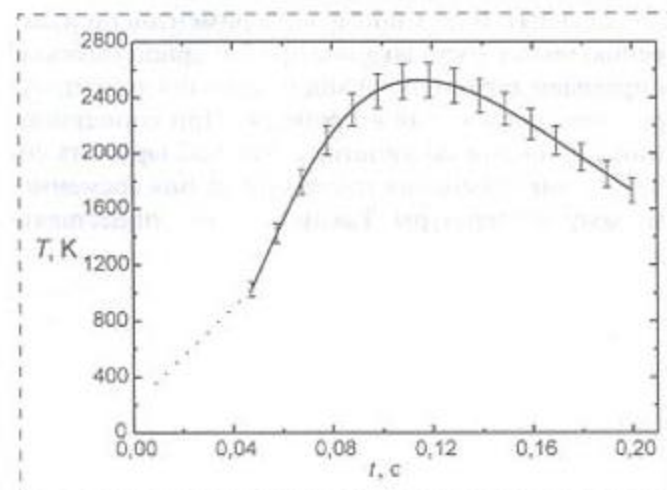


Рис. 6. Временной ход температуры кварцевого волокна в процессе "лазерной вытяжки" острий БОЗ

происходит некоторая стабилизация, сопровождающаяся незначительным снижением температуры. Причина такой стабилизации состоит в том, что общее количество теряемой энергии посредством конвективного охлаждения и смещения зоны нагрева (характерного для данной оптической схемы) выравнивается с энергией, поглощаемой волокном. Длительность этого участка на графике, видимо, отвечает за общую длину получаемого острия. Далее температура в зоне растяжения начинает падать. Это происходит в результате уменьшения диаметра волокна до значения, соизмеримого с длиной волны излучения CO_2 -лазера, и на процесс нагрева волокна начинает влиять эффект рассеяния излучения.

Уменьшение температуры приводит к увеличению вязкости, что ведет к обрыву волокна в наиболее тонкой части при температуре 1600 К. Обрыв при низкой температуре благоприятен при вытяжке, так как в этом случае можно избежать заплывания вершины острия под действием сил поверхностного натяжения, которое, в конечном итоге, могло бы принести к снижению коэффициента пропускания и эффективности БОЗ.

Заключение

В статье рассмотрены особенности лазерной технологии формирования оптоволоконных зондов для СБОМ — особенности тепловой вытяжки с лазерным нагревом. На основе данных скоростной киносъемки процесса изучена кинетика "лазерной вытяжки" зондов. Показано, что процесс занимает 0,2–0,28 с, включая длительный период нагрева до температуры размягчения (соответственно, 0,15–0,25 с) и очень короткую стадию непосредственного формирования острия (сотые доли секунды). В результате экспериментов по измерению температуры волокна при "лазерной вытяжке" определен характерный ход изменения температуры зоны растяжения в процессе. При сопоставлении с данными по кинетике легко обнаружить соответствие изменения геометрии острия временно-му ходу температуры. Таким образом, представля-

ется возможность проконтролировать некоторые параметры БОЗ в процессе их изготовления — длину острия и размеры вершины — путем введения в установку соответствующей обратной связи по времени нагрева оптоволокон. Реализация такой обратной связи в представленной в статье установке позволило несколько оптимизировать процесс и получить улучшение характеристик БОЗ — снижение общей длины и уменьшение размеров вершины острия. Это должно положительно отразиться на пропускании БОЗ и обеспечиваемой им разрешающей способности устройств СБОМ. В свою очередь, данные характеристики БОЗ являются весьма важными при практическом использовании СБОМ, в том числе и в приложениях микро- и нанoeлектроники.

Список литературы

1. Létal P., Grmela L., Tománek P. Near-field photocurrent Spectroscopy: supersolving method for of Semiconductor interfaces // 8th co-mat-tech 2000, 4, stu Bratislava. 2000. P. 141–146.
2. Herndon M. K., Collins R. T., Hollingsworth R. E., Larson P. R., and Johnson M. B. Near-field scanning optical nanolithography using amorphous silicon photoresists // Appl. Phys. Lett. — Jan. 1999. 74 (1). P. 141–143.
3. Smolyaninov I., Mazzoni D. L., and Davis C. C. Near-Field, Direct-Write Ultra-Violet Lithography and Force Microscopic Studies of the Lithographic Process // Appl. Phys. Lett. 1995. 67. P. 3859–3861.
4. Davy S., and Spajer M. Near field optics: snapshot of the field emitted by a nanosource using a photosensitive polymer // Appl. Phys. Lett. 1996. 69. P. 3306.
5. Massanell J., Garcia N., and Zlatkin A. Nanowriting on ferroelectric surfaces with a scanning near-field optical microscope // Opt. Lett. 1996. 21. P. 12.
6. Kalachev A. I., Smirnov I. B., Veiko V. P. et al. Peculiarities of laser-assisted drawing-out processing of optical probes for SNOM // Proceedings SPIE. 1999. Vol. 3822. P. 199–206.
7. Атласов К. А., Вейко В. П., Калачев А. И., Капорский Л. Н., Яковлев Е. Б. Экспериментальные и теоретические исследования процесса "лазерной вытяжки" оптических ближнепольных зондов // Известия АН. Сер. физ. 2001. Т. 65. № 6. С. 941–945.
8. Williamson R. L., and Miles M. J. Melt-drawn Scanning Near-Field Optical Microscopy Probe Profiles // Appl. Phys. 1996. 80 (9). P. 4804–4812.
9. Снопко В. Н. Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения. Минск: Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси. 1999. 224 с.
10. Рибо Г. Оптическая пирометрия. М. Л.: ГТТИ. 1934. 455 с.

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 681.586

Е. А. Мокров, д-р техн. наук,
НИИФИ, г. Пенза

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДАТЧИКОВОЙ АППАРАТУРЫ

Рассмотрены требования, предъявляемые к датчиково-преобразующей аппаратуре (ДПА), используемой в ракетно-космической технике (РКТ) и других отраслях. Представлены основные направления совершенствования ДПА на базе современных технологий.

Динамика современного научно-технического прогресса требует непрерывного увеличения расходов на науку, причем с соблюдением оптимальных пропорций между фундаментальными, прикладными исследованиями и разработками. В противном случае она превратится в "квазинауку" из-за несоответствия научно-технического потенциала страны уровню новизны, сложности и масштабности требующих решения научных проблем.

Проанализировав социально-экономическую и политическую ситуацию в стране, правящие круги, по-видимому, осознали, что перелома в финансировании прикладных исследований и разработок за счет внебюджетных источников в ближайшее время ожидать не приходится. Это потребовало поиска новых форм финансирования высокоэффективных прикладных научно-технических разработок за счет средств федерального бюджета. Одна из них — финансирование научно-технических разработок, имеющих коммерческую значимость, за счет бюджетных средств на условиях возвратности и платности.

Вместе с тем следует отметить, что государство и ранее внедряло в практику механизмы финансирования прикладных исследований и разработок из федерального бюджета на возвратной основе в рамках Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Опыт деятельности указанного Фонда показал, что финансовой поддержке подлежат 25—30 % от числа рассмотренных проектов. Ежегодный возврат средств Фонду составляет 66 %. В настоящее время Фонд отходит от возвратного финансирования и все больше средств предоставляет субъектам

малого предпринимательства в научно-технической сфере на безвозвратной основе.

Анализ описанного механизма кредитования за счет средств бюджета свидетельствует о его индифферентности к НИОКР, несущим определенную степень риска. Мировая статистика свидетельствует о том, что из 100 прикладных разработок до рынка доходят всего 5—8 и только половина из них дает коммерческий результат. Это значит, что нынешняя система государственного возвратного финансирования мероприятий по разработке и внедрению научно-технических достижений в производство нацелена в основном на поддержку безрисковых проектов, т. е. проектов, направленных на создание локальных, улучшающих инноваций, а не оазисных, прорывных, определяющих облик будущего.

На основании вышеизложенного можно заключить, что в ближайшие годы не следует ожидать значительного увеличения объемов финансирования НИР из средств госбюджета, невзирая на актуальность проблем. Однако следует заметить, что по многим отраслям имеет место значительный неудовлетворенный спрос на средства измерений с высокими потребительскими качествами, особенно в части широких функциональных свойств, точности и стабильности, невысокой стоимости.

В целях повышения эффективности использования ограниченных бюджетных средств, минимизации коррупции в процессе их распределения целесообразно на уровне Минпромнауки России разработать соответствующий нормативный акт, в котором четко прописать систему государственного возвратного финансирования научно-технических проектов, исключаящую двойное толкование тех или иных терминов, субъективное и предвзятое мнение "распределителей" ассигнований.

Процесс выбора научно-технических проектов должен быть связан с оценкой соответствия инновационного потенциала предприятий (участников конкурса) новизне, сложности и масштабности решаемых проблем. От качества такой оценки во многом будет зависеть эффективность инновационных процессов и, как следствие, вероятность своевременного возврата в бюджет полученных средств.

Обладая достаточным кадровым потенциалом с высокой квалификацией, производственно-технологической и испытательно-градуировочной базой, НИИФИ имеет объективно хороший инновационный потенциал. Между тем, "борьба" за наборо-

ры объемов делает невозможной реализацию "свежих" мыслей, "прорывных" решений.

НИИФИ — головное предприятие по разработке датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА) для РКТ. Основой его деятельности является проведение НИОКР и выпуск конкурентоспособной продукции на высоком научно-техническом уровне в обеспечение "Федеральной космической программы России на 2001—2005 гг." и других государственных программ.

Датчики как первичные измерительные преобразователи стали важнейшими элементами информационно-измерительных систем, систем автоматического управления технологическими процессами и аналитических измерений. Датчики обычно преобразуют незлектрические физические или химические величины в электрические сигналы. Датчики находят бесчисленные области применения во всех сферах жизнедеятельности человека. Измерения с использованием датчиков стали основным фактором познания мира.

Датчик при внешней простоте, малых габаритных размерах и массе представляет собой сложнейшее приборное конструкторско-технологическое устройство, чувствительный элемент которого работает в тяжелых эксплуатационных условиях, в широких диапазонах температур от -253 до $+3000$ °C, давлений от $0,001$ до 300 МПа, при вибрациях до 10^5 g и акустических шумах до 194 дБ.

Датчик должен иметь механическую прочность выше механической прочности объекта (элемента, узла, агрегата), на котором он установлен, поскольку для измерения физических величин при воздействии перегрузок, ударов, температур, вибраций, ускорений, тепловых потоков, давлений и других влияющих величин во внештатной ситуации он должен "жить" и функционировать дольше, чем изделие. Датчик должен иметь минимальные массу, объем и токопотребление, чтобы не ухудшать тактико-технические характеристики инженерного объекта, должен иметь и обеспечивать гарантированные метрологические характеристики на протяжении всего срока эксплуатации.

Особенно жесткие метрологические и эксплуатационные требования предъявляются к датчикам, устанавливаемым на ракетных двигателях. Требованиями сегодняшнего дня считаются точность измерения давления на уровне $0,1$ — $0,2$ % в эксплуатационных условиях, виброустойчивость 600 — 1200 g, термоустойчивость от -256 до $+300$ °C. В последние годы к средствам телеизмерений стали предъявлять повышенные требования по надежности ($P \geq 0,999$), ресурсу (до 100 тыс. ч.), срокам сохранения (до 25 лет).

Потребность в датчиках стремительно растет в связи с быстрым развитием автоматизированных сис-

тем контроля и управления, внедрением новых технологических процессов, переходом к гибким высокопроизводительным автоматизированным производствам. Помимо высоких метрологических характеристик датчики должны обладать высокой надежностью, долговечностью, стабильностью, малыми габаритными размерами, массой, энергопотреблением, совместимостью с микроэлектронными устройствами обработки информации, низкой трудоемкостью изготовления и небольшой стоимостью.

Датчики становятся основными элементами, определяющими общее качество и стоимость информационно-измерительных и управляющих систем. Для современного этапа развития этой области техники характерны следующие стоимостные данные:

- датчики — 40 % общей стоимости;
- устройства обработки данных — 20 %;
- устройства регистрации, отображения — 40 %.

Независимо от ситуаций, складывающихся в экономике, спрос на датчики как на основные средства измерения, контроля, диагностики и управления различными физическими объектами неизменно растет и составляет ежегодно от 10 до 25 %. Наибольшим спросом пользуются датчики, обеспечивающие высокую точность, надежность, многообразие, длительный срок службы, широкие функциональные возможности. Последнее качество считается особенно ценным и достигается путем их "интеллектуализации" (программной, цифровой обработкой информационных сигналов).

Для современных производств электроэнергетики, АЭС, тепловых и гидроэлектростанций, производств химических взрывчатых веществ и радиоактивных веществ недооценка значения измерений и контрольно-измерительной техники на основе датчиков (по информации от которых возможно прогнозировать развитие опасных ситуаций, а следовательно, и предотвращать их) приводит, в лучшем случае, к недостижению поставленных целей, а в худшем случае — к катастрофам, которые случались в атомной, ракетно-космической, авиационной промышленности и других отраслях.

На рис. 1 представлено развитие мирового рынка датчиков по областям применения [2].

На основании анализа данных, содержащихся в предварительном варианте Кадастра, работы над которым были начаты в ИПУ АН СССР еще в 1985 г., было установлено, что из 2000 параметров, подлежащих измерению и контролю, у нас в стране только 300 обеспечены средствами измерения и контроля, причем половина из них не отвечает в полной мере не только перспективным требованиям, но и требованиям настоящего времени.

Измерения электрических и незлектрических величин базируются на использовании различных физических законов и явлениях. Специалистам из-

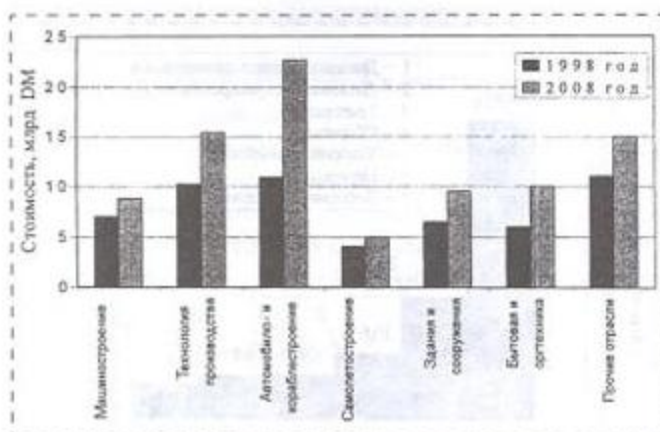


Рис. 1. Развитие мирового производства датчиков до 2008 г. по областям применения

вестны около 400 физических явлений, которые могут быть положены в основу создания средств измерений.

Наиболее широко на практике используется около 30 явлений и принципов действия датчиков. Следует заметить, что с внедрением в практику датчиков, созданных на новых принципах действия, датчики на традиционных принципах действия остаются доминирующими благодаря их постоянно-му конструктивно-технологическому и схемотехническому совершенствованию.

В таблице приведена информация об универсальности и эффективности некоторых наиболее широко используемых принципов действия датчиков.

Универсальность принципов преобразования

Принцип действия	Физическая величина																	
	Давление	Усилие	Положение (в пространстве без механической связи)	Перемещение	Скорость (линейная)	Ускорение	Вибрация	Близость (без механической связи)	Температура	Состав и раздел сред	Обороты	Деформация	Координаты точки (без механической связи)	Угловая скорость	Пространственные углы	Углы скольжения и атаки	Влажность	Расход
Емкостный	++	++	+	++	—	++	+	++	+	+	—	+	+	—	—	+	+	—
Пьезоэлектрический	+	+	—	—	—	+	++	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Дифференциально-трансформаторный	+	+	+	++	+	+	+	++	—	—	—	—	+	—	—	+	—	—
Контактная разность потенциалов	—	—	—	—	—	—	—	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Тензорезистивный	++	++	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	—	—	—	+	+	—
Потенциометрический	+	+	—	++	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	—	—
Токовых	+	—	+	+	+	—	—	++	—	—	—	+	+	—	—	+	—	—
Термисторный	—	—	—	—	—	—	—	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Эффект Холла	—	—	+	++	+	—	—	++	—	—	++	—	+	—	—	+	—	—
Пьезорезистивный	++	++	—	—	—	++	++	—	—	+	—	+	—	—	—	+	+	—
Анизотропия и свет	+	+	+	++	+	++	++	++	+	+	+	+	+	+	—	+	+	—
Магниторезистивный	—	—	+	+	—	—	—	++	—	—	+	—	+	—	—	+	—	—
ПАВ	+	+	—	—	—	+	+	—	—	—	—	+	—	—	—	+	—	—
Пьезорезонансный, резонансный	++	++	—	—	—	++	—	—	+	—	—	—	—	+	—	—	+	—
Индукционный	—	—	—	—	++	—	+	—	—	—	++	—	—	+	—	—	—	—
Эффект Кориолиса	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	++
Эффект Виганда	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	++	—	—	+	—	—	—	—
Эффект Матусси	+	+	—	—	—	+	+	—	—	—	—	+	—	—	—	+	—	—
Z-эффект в полупроводниковых p-n структурах	+	+	+	+	—	—	+	++	+	—	++	—	+	+	—	—	—	+
Эффект Виллари	+	+	—	+	—	++	++	—	—	—	—	—	—	—	—	+	—	—
Туннельный эффект	+	+	—	—	—	++	++	—	—	—	—	+	—	+	—	+	+	+

Примечание: "+" — используется; "++" — использование предпочтительное; "—" — использование нецелесообразно.

Примечание: "+" — используется; "++" — использование предпочтительное; "—" — использование нецелесообразно.

На основе проведенных у нас в стране и за рубежом научно-исследовательских работ среди большого многообразия типов датчиков установлено значительное преимущество *интегральных датчиков*, построенных на базе технологий микроэлектроники и микромеханики. Положительными качествами этих датчиков являются интеграция с чувствительным элементом промежуточных устройств преобразования и нормализации сигналов, малые габаритные размеры, высокая надежность, невысокая стоимость, широкая номенклатура измеряемых физических и электрических величин.

Улучшенные характеристики интегральных датчиков (точность проводимых измерений возрастает до 0,1 %), возможность их эксплуатации в экстремальных условиях окружающей среды (высокий перепад температур, вибрация, ударные нагрузки, влажность, повышенная агрессивность сред, загрязненность и т. д.) служат существенным фактором обоснованной их необходимости в аэрокосмической, военной, автомобильной и других отраслях промышленности, а также в агропромышленном комплексе и социальной сфере.

Поиск новых видов (типов) средств измерительной техники в развитых странах осуществляется постоянно, при этом постоянно расширяется круг используемых материалов и технологий. К настоящему времени стало совершенно ясным, что микроэлектронная технология вносит радикальные улучшения буквально во все типы датчиковой аппаратуры. Это приводит к тому, что традиционные принципы преобразования (тензорезистивный, пьезорезистивный, пьезоэлектрический, индуктивный, емкостный, вихревой и др.) получают дальнейшее развитие вплоть до радикального улучшения метрологических и конструкторско-эксплуатационных характеристик, особенно в части повышения надежности, уменьшения габаритных размеров и массы. Однако это требует нового мышления, ухода от стереотипных конструкций интегральных преобразователей, использования при проектировании датчиков новых конструктивных материалов.

Во всем многообразии датчиков электрических и неэлектрических величин объем производства и номенклатура датчиков давлений составляет 24 % от общего объема производства всех датчиков и около 60 % от общего объема производства датчиков физических величин. Распределение датчиков (выпускаемых в НИИФИ) по физическим величинам представлено на рис. 2.

Как видно на рис. 2, датчики давлений занимают доминирующее положение как по количеству, так и по общей стоимости.

В дополнение к изложенным данным на рис. 3 представлены распределения датчиков по принци-

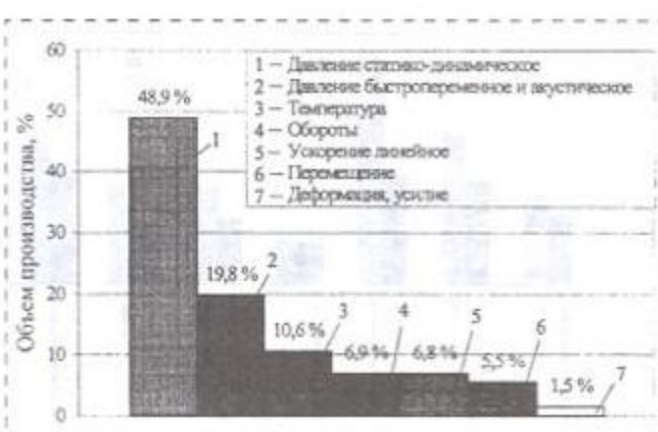


Рис. 2. Распределение объема производства датчиков физических величин, поставленных НИИ физических измерений в 2002 г. различным отраслям

пам действия. На рис. 3 видно, что доминирующее положение занимают тензорезистивные, пьезоэлектрические, емкостные датчики. Эти факты обусловлены эффективностью и универсальностью этих принципов действия, использованием при их внедрении микроэлектронных технологий.

В период 1975—1987 гг. на базе микроэлектронных технологий сформировалось новое перспективное направление приборостроения — микросистемотехника. Первыми приборами этого направления явились датчики давления и акселерометры авиационно-космического и автомобильного назначения. Иницирующим фактором в развитии микросистемной техники (МСТ) стало появление так называемых микроэлектромеханических систем (английская аббревиатура MEMS — microelectromechanical systems), в которых гальванические связи находятся в тесном взаимодействии с механическими [3].

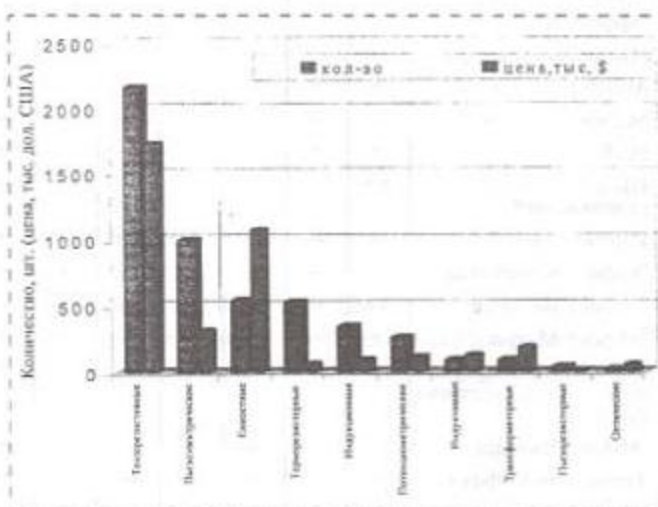


Рис. 3. Соотношение количества и стоимости датчиков, заказанных в 2002 г. на поставку. Распределение по принципам действия

Выделяют следующие стимулирующие факторы развития МСТ:

- использование кремния в качестве конструкционного материала;
- разработка промышленных технологий жидкостного объемного травления кремния для формирования мембран, струн, балок и других упругих чувствительных элементов;
- разработка технологий формирования объемных структур с использованием синхронного излучения, гальванического осаждения и прецизионного литья полимера.

Отличительными особенностями МСТ-приборов являются:

- активное использование третьего измерения;
- интеграция электрических и оптических связей с механическими;
- интеграция физико-химических и технологических базисов микро- и биотехнологии;
- интеграция исполнительно-технологических и контрольно-диагностических процедур в микрообъемах и на поверхности твердого тела.

МСТ-приборы характеризуются: новизной, наукоемкостью, конкурентоспособностью, потенциальной инвестируемостью на этапе разработки, тиражируемостью, низкими материалоемкостью и энергоемкостью, широким рынком потребления.

Имеющиеся в НИИФИ производственно-технологическая база и научно-технический задел позволили приступить к разработке МСТ-датчиков линейных ускорений, датчиков давлений, гироскопов.

На созданном научно-техническом заделе в обеспечение "Федеральной космической программы России на 2001—2005 гг." и других государственных программ НИИФИ проводит опытно-конструкторские работы (ОКР) по следующим направлениям.

Датчики давления:

- датчики давления повышенной точности для измерения избыточного давления агрессивных криогенных сред с основной погрешностью не более 0,25 % и температурным диапазоном от -253 до $+100$ °C;
- малогабаритные высокотемпературные датчики аэрогазодинамического давления массой не более 0,01 кг, работоспособные в диапазоне температур от -100 до $+250$ °C;
- малогабаритные высокочувствительные пьезоэлектрические датчики акустических давлений с расширенными эксплуатационными возможностями, обеспечивающие измерения акустических давлений в диапазоне от 115 до 180 дБ, в частотном диапазоне от 10 до 10 000 Гц с увеличенным на порядок ресурсом;

- волоконно-оптические датчики давления с повышенной пожаровзрывобезопасностью и дистанционностью измерений до 200 м;
- многофункциональные фольговые тензомодули для унифицированных конструкций датчиков давлений, сил, деформаций в диапазоне рабочих температур от -100 до $+200$ °C;
- параметрический ряд датчиков разности знакопеременных давлений;
- унифицированный ряд датчиков давления с единой градуировочной характеристикой для систем автоматического управления энергетических установок;
- трехканальный датчик давления с унифицированным выходным сигналом для систем энергоснабжения космических аппаратов, имеющего повышенные требования по надежности, ресурсу и стабильности.

Датчики деформации:

- ряд высокотемпературных тензорезисторных датчиков деформации на основе тонкопленочной технологии.

Датчики перемещения:

- датчики линейных перемещений без механической связи для управляющих поверхностей солнечных батарей повышенной точности, с расширенным диапазоном измерений, увеличенным ресурсом.

Датчики оборотов:

- гальваномагнитный датчик частоты вращения на основе магнитодиода.

Акселерометры:

- миниатюрные прецизионные низкочастотные линейные акселерометры с диапазоном измерений от ± 11 до ± 100 м/с² с основной погрешностью, не превышающей 0,05 %, массой не более 50 г;
- акселерометры сверхмалых линейных ускорений для измерения ускорений в диапазоне от $\pm 0,0014$ до $\pm 0,0080$ м/с² с нормированным выходным сигналом;
- акселерометр, работающий в широком диапазоне температур.

Датчики объемных концентраций кислорода, водорода, метана:

- датчики объемных концентраций H_2 , O_2 , метана в газовых смесях азота, гелия, воздуха для стеллов и отсеков ракет-носителей орбитальных модулей с длительным сроком активного существования с основной погрешностью не более 0,5 %.

Преобразующая аппаратура для датчиков статико-динамических параметров:

- малогабаритные с длительным сроком активного существования вторичные измерительные преобразователи сигналов для тензорезистор-

ных датчиков давления с погрешностью преобразования не более 0,2 %, частотным диапазоном 0—1000 Гц, током потребления не более 40 мА, массой не более 0,1 кг;

- информационно-измерительная система измерения статико-динамических параметров (давления, силы, деформации, температуры) при отработке изделий в стендовых условиях.

Анализ комплексных показателей технического уровня разрабатываемых датчиков, аналогов и "идеального образца" показал, что создаваемые средства измерения существенно (на 30—70 %) превосходят аналоги, а по некоторым требованиям близки к "идеальному образцу".

Основными задачами ОКР по созданию датчиков преобразующей аппаратуры (ДПА) являются:

- повышение быстродействия преимущественно за счет микроминиатюризации, а также за счет материалов с высокими механическими свойствами;
- повышение точности измерений за счет применения наиболее эффективных принципов преобразования, современных комплектующих и материалов, микропроцессорной обработки информационных сигналов прогрессивных измерительных цепей, в том числе автокомпенсационных;
- расширение диапазонов измерений в сторону малых и больших значений измеряемых величин за счет использования новых конструктивных схем, применения новых сплавов, кремния, кварца, керамики;
- повышение термостойкости датчиков в расширенном диапазоне температур, в том числе при нестационарных воздействиях за счет термостойких материалов и электронных компонентов, специальных принципов преобразования;
- повышение виброустойчивости преимущественно за счет уменьшения габаритных размеров и массы, применения компенсационных элементов, технологии микромеханики (микроминиатюризации);
- увеличение дистанционности измерений;
- повышение помехоустойчивости за счет использования корреляционного метода измерения, генераторных измерительных цепей, передачи информационных сигналов по волоконно-оптическим линиям связи, использования избыточных кодов, аналоговой и цифровой фильтрации;
- увеличение ресурса работы датчиков за счет подбора особо стабильных и прочных материалов, особенно кристаллических (кремний, кварц, сапфир, керамика), обеспечения достаточного запаса прочности и рабочим режимам;

- повышение надежности за счет резервирования и применения элементов с малой и равной интенсивностью отказов;
- повышение пожаровзрывобезопасности за счет применения волоконно-оптических чувствительных элементов (ЧЭ), конструктивной и схемотехнической защиты, снижения энергопотребления;
- снижение энергопотребления за счет применения генераторных ЧЭ, специальных измерительных цепей, микромощной измерительной базы, микрорезонаторных ЧЭ;
- обеспечение сопряжения систем измерения с ПЭВМ;
- снижение массы и габаритных размеров датчиков за счет внедрения микромеханических ЧЭ с использованием технологий микроэлектроники;
- обеспечение широкой унификации и стандартизации датчиков по посадочным размерам, выходным сигналам, схемам внешних соединений, что позволит в последующем с малыми затратами перейти на новые датчики;
- упрощение и снижение затрат на обслуживание, эксплуатацию.

В ходе реализации ОКР предусмотрено внедрение следующих критических технологий и их элементов:

- ♦ "Системы искусственного интеллекта и виртуальной реальности" — создание интеллектуальных датчиков и подсистем измерения физических величин на их основе;
- ♦ "Системы математического моделирования" — автоматизация разработки датчиков для систем аварийной защиты повышенной надежности;
- ♦ "Микросистемная техника и микросенсорика" — внедрение адаптированных базовых технологий применительно к производству чувствительных элементов датчиков на основе тонких кремниевых мембран;
- ♦ "Сверхбольшие интегральные схемы и нанoeлектроника" — использование БИС общего назначения и БИС собственной разработки;
- ♦ "Лазерные технологии" — адаптирование и внедрение прогрессивных технологий лазерной подгонки и сварки при производстве ДПА;
- ♦ "Прецизионные и мехатронные технологии" — адаптирование и внедрение наномеханической обработки деталей и узлов ЧЭ микродатчиков физических величин, в том числе многофункциональных;
- ♦ "Электронно-ионно-плазменные технологии" — адаптирование и внедрение перспективных ионно-плазменных технологий при производстве ДПА;

♦ "Гибкие производственные системы" — адаптивное и внедрение перспективных технологий при производстве герморазъемов, изоляторов, деталей и узлов ДПА повышенной надежности для работы в экстремальных условиях;

♦ "Материалы и сплавы со специальными свойствами" — применение материалов при разработке и производстве ДПА повышенной надежности при работе в экстремальных условиях;

♦ "Авиационная и космическая техника с использованием новых технических решений, включая нетрадиционные компоновочные схемы" — комплектация авиационно-космических изделий специальными (SMART) датчиками физических величин, выполняющими: активную коррекцию

сигналов при изменении внешних условий; необходимые преобразования сигналов, контроль состояния; выдачу сигнала готовности в центральный процессор, автоматическое масштабирование и градуировку; задачи оконечного устройства в распределенной системе управления.

Список литературы

1. Мокров Е. А. НИИ физических измерений. Специализация — космические датчики // Датчики и системы. 2000. № 1. С. 28—30.
2. Мировой рынок датчиков общего применения в 2008 г. // Экспресс-информация "Контрольно-измерительная техника". 2000. № 3. С. 2—7.
3. Климов Д. М. и др. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—6.

УДК 621.3.049.77

В. Д. Вернер, д-р техн. наук, проф.,
НПК "Технологический центр" МИЭТ,
И. А. Пурихванидзе,
Минпромнауки России

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДУЛЬНОСТЬ В МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

Рассмотрены принципы реализации конструкционной и технологической модульности в микроразборке и микросистемной технике. Обосновывается тезис о приоритете конструкционной модульности для микроразборки и технологической модульности для микросистемной техники.

Роль "высоких" технологий в развитии инновационного потенциала XXI века в сентябре этого года обсуждалась на конференции "Ключевые технологии 2010" Немецкого общества инженеров в Дрездене [1].

К числу важнейших направлений были отнесены микро- и нанотехника, информационная техника и биомедицинская техника. Предварительный опрос 300 экспертов показал, что 57 % специалистов считает микросистемную технику и нанотехнику движущей силой инновационного развития в настоящее время. Информационная техника, включая сети и мобильную связь, получили 50 %, биотехнология и наука о жизни — 47 %. Влияние этих на-

правлений на промышленность как "высокое или самое высокое" отметили 90 % опрошенных. Интересен и другой аспект этого опроса. Немецкие эксперты считают, что в области микроразборки Европа не в состоянии конкурировать с США. Европа приближается к США в области информационной техники и имеет преимущество в области микросистемной техники, нано- и медицинской техники. Три четверти немецких экспертов считают, что этому способствуют развитая технология и благоприятный климат развития бизнеса в указанных направлениях в Германии. Для нашего анализа существенным является признание высокой роли технологии в ин-

новационных процессах XXI века. В связи с этим мы хотим специально остановиться на аспекте различия двух терминов "техника" и "технология" в приложении к двум новым направлениям: микросистемной технике и нанотехнологии.

Любое многообразие понятий вызывает желание их классификации, т. е. их объединения в группы. Разнообразие форм классификации приводит к необходимости стандартизации. В принципе, этот процесс может быть доведен до абсурда. Естественный отбор определяется опытом и полезностью классификации и стандартизации. Мы уже указывали на многообразие форм классификации в микросистемной технике [2]. Поводом для возвращения к этой теме послужила дискуссия о месте микросистемной техники в ряду новых видов техники и технологий их создания в XXI веке (см. например [3, 4]). В энциклопедическом определении технологии [5] сказано: "Технология — совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, формы, сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции".

♦ "Гибкие производственные системы" — адаптивное и внедрение перспективных технологий при производстве герморазъемов, изоляторов, деталей и узлов ДПА повышенной надежности для работы в экстремальных условиях;

♦ "Материалы и сплавы со специальными свойствами" — применение материалов при разработке и производстве ДПА повышенной надежности при работе в экстремальных условиях;

♦ "Авиационная и космическая техника с использованием новых технических решений, включая нетрадиционные компоновочные схемы" — комплектация авиационно-космических изделий специальными (SMART) датчиками физических величин, выполняющими: активную коррекцию

сигналов при изменении внешних условий; необходимые преобразования сигналов, контроль состояния; выдачу сигнала готовности в центральный процессор, автоматическое масштабирование и градуировку; задачи оконечного устройства в распределенной системе управления.

Список литературы

1. Мокров Е. А. НИИ физических измерений. Специализация — космические датчики // Датчики и системы. 2000. № 1. С. 28—30.
2. Мировой рынок датчиков общего применения в 2008 г. // Экспресс-информация "Контрольно-измерительная техника". 2000. № 3. С. 2—7.
3. Климов Д. М. и др. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—6.

УДК 621.3.049.77

В. Д. Вернер, д-р техн. наук, проф.,
НПК "Технологический центр" МИЭТ,
И. А. Пурихванидзе,
Минпромнауки России

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДУЛЬНОСТЬ В МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ

Рассмотрены принципы реализации конструкционной и технологической модульности в микроэлектронике и микросистемной технике. Обосновывается тезис о приоритете конструкционной модульности для микроэлектроники и технологической модульности для микросистемной техники.

Роль "высоких" технологий в развитии инновационного потенциала XXI века в сентябре этого года обсуждалась на конференции "Ключевые технологии 2010" Немецкого общества инженеров в Дрездене [1].

К числу важнейших направлений были отнесены микро- и нанотехника, информационная техника и биомедицинская техника. Предварительный опрос 300 экспертов показал, что 57 % специалистов считает микросистемную технику и нанотехнику движущей силой инновационного развития в настоящее время. Информационная техника, включая сети и мобильную связь, получили 50 %, биотехнология и наука о жизни — 47 %. Влияние этих на-

правлений на промышленность как "высокое или самое высокое" отметили 90 % опрошенных. Интересен и другой аспект этого опроса. Немецкие эксперты считают, что в области микроэлектроники Европа не в состоянии конкурировать с США. Европа приближается к США в области информационной техники и имеет преимущество в области микросистемной техники, нано- и медицинской техники. Три четверти немецких экспертов считают, что этому способствуют развитая технология и благоприятный климат развития бизнеса в указанных направлениях в Германии. Для нашего анализа существенным является признание высокой роли технологии в ин-

новационных процессах XXI века. В связи с этим мы хотим специально остановиться на аспекте различия двух терминов "техника" и "технология" в приложении к двум новым направлениям: микросистемной технике и нанотехнологии.

Любое многообразие понятий вызывает желание их классификации, т. е. их объединения в группы. Разнообразие форм классификации приводит к необходимости стандартизации. В принципе, этот процесс может быть доведен до абсурда. Естественный отбор определяется опытом и полезностью классификации и стандартизации. Мы уже указывали на многообразие форм классификации в микросистемной технике [2]. Поводом для возвращения к этой теме послужила дискуссия о месте микросистемной техники в ряду новых видов техники и технологий их создания в XXI веке (см. например [3, 4]). В энциклопедическом определении технологии [5] сказано: "Технология — совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, формы, сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции".

Таким образом, технология — это активный элемент создания новой техники. Мы сознательно будем использовать два разных понятия ("техника" и "технология") для определения двух ступеней миниатюризации на уровне микро- и нанометра. Принципиальное отличие нанотехнологии от всех предшествующих технологий заключается в ее направленности на работу с фундаментальными объектами-атомами. Именно это позволяет рассматривать нанотехнологию как новое революционное направление в технологии, способное оказать воздействие на все сферы деятельности человека и на него самого. По этой причине США стремятся занять лидирующие позиции в области нанотехнологии [6]. Микросистемная техника оказалась как бы в тени новорожденного ребенка научно-технического прогресса. Конечно, на молекулярном и клеточном уровнях нанотехнология может влиять на человека. Однако воздействие должно быть осуществлено в нужном месте, а способными это сделать, скорее всего, будут методы, основанные на использовании микросистем. Конструкционные материалы, источники энергии и многое другое для автомобиля могут быть изготовлены методами нанотехнологии, но автомобиль останется макрообъектом, многие агрегаты которого будут содержать встроенные микросистемы. Таким образом, можно считать микросистемы естественным мостиком между микро- и макромиром. По этой причине наносистемы не могут заменить микросистемы. Оба этих направления должны развиваться на базе синергетической связи между ними. И на самом деле, противопоставление их скорее вызвано политическими мотивами (прежде всего борьбой за финансирование), чем реальным антагонизмом этих двух направлений. Более того, появились общие про-

граммы "нано-микро" или "микро-нано", конференции и сетевые структуры, которые объединяют эти два направления.

♦ Авторы работы [7], анализируя 6-ю рамочную программу европейских исследований в области нано- и микроминиатюризации, ввели термин "микро- и нанотехнология". (Micro- & Nanotechnology). Главная мысль заключается в формировании идеологии интеграции наноразмеров в микро- и макросистемы, что иллюстрирует рис. 1 (см. третью сторону обложки) [7].

Как мы указывали выше, наиболее полной характеристикой производства в нанообласти является нанотехнология. Она полностью передает основное содержание данного направления. В этом смысле технология микроэлектроники также достаточно универсальна и хорошо характеризует данную область техники. Это технология нанесения, удаления или изменения поверхностного слоя (целиком или по топологии литографического рисунка) на полупроводниковой пластине.

Иными словами, "технология микроэлектроники" является таким же однозначным понятием, как нанотехнология. Слово "микроэлектроника" характеризует предметную область применения микротехнологии в электронике.

Термин "микросистемная технология", хотя и прижился, однако не может быть четко охарак-

теризован. Хотя эта технология также связана с микрообработкой, здесь нельзя однозначно определить объект обработки и универсальные способы воздействия на него. Известные рисунки, иллюстрирующие суть микросистемной технологии как раз и свидетельствуют об отсутствии такой цельности (рис. 2). Эклектичность термина "технология" по отношению к микросистемам на самом деле не снижает, а увеличивает ее влияние на конечный результат — создание микросистемы. К. Петерсен из известной фирмы Lucas Nova Sensor еще в 1995 г. заявил, что МЭМС/МСТ являются не отдельной отраслью, а критической субдисциплиной внутри множества других отраслей. Происходит дисперсия и диверсификация МЭМС/МСТ-технологий, независимая их адаптация к многочисленным другим техническим отраслям. Именно на основе синергетического трансферта технологии микроэлектроники, механической, электрохимической технологий и других методов обработки материалов стало возможным создание коммерчески эффективных образцов микросистем для вычислительной техники, медицинской техники, биохимической технологии и т. д. [8].

С этой точки зрения наиболее похожим термином является "технология машиностроения", где соединяются механическая обработка, литье, прессование и т. д.

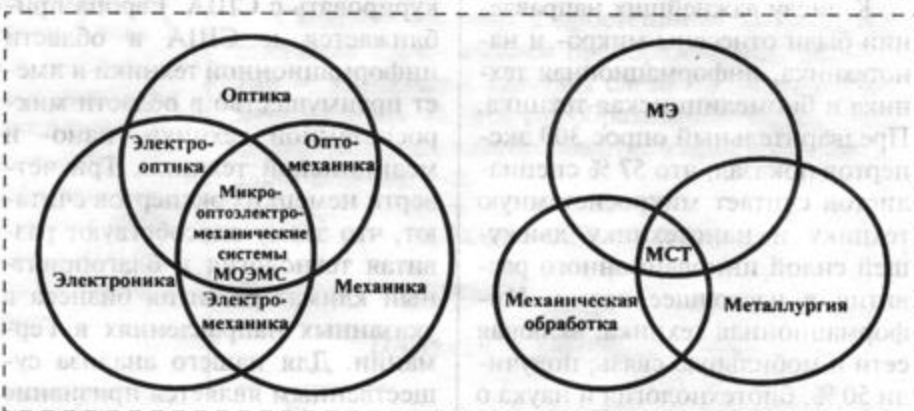


Рис. 2. Синергетика конструкций и технологий микросистемной техники [18]

Микросистемная техника ближе к машиностроению (приборостроению), электротехнике, т. е. к созданию конструкций, чем к какой-то определенной технологии. Если спроектирована конструкция микросистемы, то затем уже ищется наилучшая технология для создания в нужном количестве деталей конструкции. Наиболее простым способом конструирования является сборка изделия из модулей.

Модуль — унифицированный функциональный узел, оформленный как самостоятельное изделие [9]. Модульный принцип широко используется в электронике, модули — микропроцессоры, интегральные схемы памяти, усилители, АЦП, ЦАП и т. д., позволяют в большинстве случаев создать необходимое электронное устройство. Поэтому модульность на уровне конструкции считают [4] характерной для микроэлектроники.

Триада в конструкции классической микросистемы: чувствительный элемент (приемник внешней информации — сенсор, датчик); системы обработки сигнала чувствительного элемента (усилитель, преобразователь, процессор); устройство обратной связи (актюатор, канал связи и т. п.), способствует восприятию микросистемы как возможного сочетания трех микросистемных блоков — модулей.

Привлекательность модульности инициировала появление в Германии проектов, которые были объединены общим заголовком "модульные микросистемы" [10]. Это направление нашло отражение в немецкой программе по развитию микросистем "MST 2000+". Идеология модульности опирается на стандартизацию технологий, процедур компонентов и подсистем. Реально это означает реализацию принципа модульности на всех этапах создания новых микросистем: проектирования, конструирования и произ-

водства микросистем. Первым реальным шагом в этом направлении было создание своеобразного "конструктора" микросистемных устройств на базе стандартизованных сборочных конструкций элементов и интерфейсов (механических, электрических и т. д.). Эта программа осуществляется на базе союза Немецкого общества производителей технических систем (VDMA) и Фраунгоферских исследовательских институтов (проект "Match-X" — [11]).

Разнообразие микросистемной техники побудило представителей других направлений производства микросистем включиться в создание программ по развитию модульных систем, например, Объединения немецких производителей сенсоров (АМА) или Ассоциации химической промышленности (DECHEMA). Они ставили своей задачей создание параметрических рядов, например, датчиков давления, микронасосов и т. д., для обеспечения возможности создания комплексных микросистем. Это можно сделать, например, на базе конструктивов "Match-X" или других способов интеграции микросистемных компонентов [12]. Немецкие программы конструктивной модульности начались в 1999 г., и будут продолжаться, по крайней мере, до 2006 г. [10]. Следует отметить, что из 20 предполагаемых модулей 18 находятся на этапах "идея" или "образец". И только два модуля (микроконтроллер 16 бит и пневмоклапан) названы в 2002 г. "продуктом".

♦ Идеология модульности в микросистемной технике естественно касается не только конструкций, но и технологии их производства. Многообразие различных процессов микрообработки при производстве микросистем вызвано трансфертом технологий из различных областей (точная механика, интегральные схемы, оптика, химия и т. д.). В большинстве случаев они не могут

быть просто адаптированы к микросистемной технике по экономическим или техническим причинам и должны быть специализированы под производство микросистем. Реализация модульности в технологиях микросистем требует подробного документирования процессов, спецификации входных и выходных параметров заготовки и продуктов. На этой базе оценивается экономика для различных технологических модулей и планируется стратегия производства рыночного продукта. Таким образом, принятый в России термин "конструктивно-технологический базис" должен быть спроецирован на наиболее эффективный "конструктивно-технологический модуль". Создание конечного МСТ-продукта может потребовать использования нескольких технологических модулей.

Примером может служить разделение "полупроводниковой" технологии производства микросистемы на модуль поверхностной обработки (на предприятиях КМОП ИС) и модуль объемной обработки (в мастерских малых фирм или университетов) [13]. Выбор технологических модулей при создании определенной конструкции зависит от многих факторов, в том числе от размера серии изделий. Например, для биочипов при серии до 1000 шт. приемлемая кремниевая технология, от 10 тыс. шт. и выше целесообразно использовать модули обработки пластмасс [14]. Эффективным способом объединения технологических модулей может быть принцип "виртуального" производства, о котором говорилось в нашей статье [2].

♦ Логическим завершением идеологии модульности в микросистемной технике должно быть ее распространение на производство обрабатывающего и сборочного оборудования. Работы в этом направлении ведутся в ряде стран (Германии, Австрии и США). Та-

ким образом, модульность в конструкциях и технологиях микро-системной техники является несомненным фактором ее развития. Это объединяет ее с другим направлением микротехники — микроэлектроникой. Однако для стратегии развития важны не только сходства, но и различия этих направлений.

Принципиальным отличием микро-системной техники от микроэлектроники является то, что микро-система (не отдельный датчик или актюатор) создается под заказ определенной группы потребителей, т. е. является **заказной**. Генеральной же линией развития микроэлектроники является ориентация на **массовое производство**. Ее изделия, которые могут быть использованы как модули, — **универсальны**. Ориентация на конкретного заказчика является боковой ветвью развития микроэлектроники. Чаще всего эта часть спроса закрывается изготовлением полузаказных схем на базе конфигурируемых литографической маской (на завершающей стадии) или программируемых матричных структур (ASIC — Application Specific IC).

Невозможность создания модулей в микро-системной технике на базе универсальной технологии привело авторов [4] к мысли, что для микро-системной техники модульность важна не на уровне конструкций, а на уровне технологий. Определенное отторжение формулировки приоритета принципа модульности в технологиях микро-системной техники вызывает ее сопоставление с одной из родоначальных технологий — микроэлектронной технологией. В ней также существуют блоки процессов, объединенных по принципу формирования узла (затвор в КМОП-технологии) или вида технологии (КМОП и БиКМОП). Однако набор процессов в данном случае не меняет принципиально способ создания конструкции (например, от двух-

мерной к трехмерной), изменяет параметры отдельных процессов, а конструкция по-прежнему остается планарной. На рис. 3 (см. третью сторону обложки) мы попытались проиллюстрировать различие роли конструкционной и технологической модульности для двух вариантов создания новой техники. В варианте I можно создать большое количество различных конструкций на базе небольшого числа универсальных конструкционных модулей. Эти модули производят на базе универсальной технологии с возможным использованием специфических технологических модулей. К этому варианту, по нашему мнению, можно отнести нанотехнику и микроэлектронику. Действительно, прогресс в микроэлектронике связан с развитием универсальной технологии (в настоящее время с КМОП-технологией) и может быть охарактеризован одним глобальным параметром — минимальным размером литографического рисунка (1,0; 0,8...0,05 мкм). Зная этот параметр, можно создать микроэлектронные универсальные конструкционные модули. Закон Г. Мура (удвоение степени интеграции, в среднем, каждые 18 мес.) позволял и позволяет прогнозировать развитие микроэлектроники уже несколько десятилетий. К варианту II мы отнесли микро-системную технику. В этом случае для производства новой конструкции (возможно с использованием специфических конструкционных модулей) в зависимости от назначения и тиражности изделий выбирают наиболее подходящий технологический модуль из числа доступных универсальных модулей.

♦ Оценка роли конструкционной модульности микро-систем предполагает некоторую самостоятельность последних. Однако в большинстве случаев реального применения микро-система является комплектующей макро-системы. Бурно развивающиеся

направление "встроенных систем" (embedded systems), отвечающих на запросы производителей конкретных макро-систем, требует согласования не внутри деталей микро-системы, а между элементами макро-системы. 80 % объема рынка микро-систем занимают головки принтеров и записи/считывания информации, которые по существу, были первыми примерами встроенных микро-систем. Производство таких микро-систем специализировано под конкретное изделие на базе определенных технологических модулей.

Сформулируем точку зрения авторов по рассмотренным проблемам в виде трех тезисов:

1. Несмотря на высокие приоритеты новых направлений миниатюризации нано- и микротехники (микроэлектроника и микро-системы), главным параметром их оценки остается возможность и эффективность их встраивания в макро-системы.

2. Существует синергетическая связь этих трех основных направлений миниатюризации, каждое из них обладает спецификой, с учетом которой только и возможно их эффективное развитие.

3. Заказной характер процесса выполнения микро-систем требует выбора эффективных технологий их создания на базе сети технологических модулей.

♦ Проведенное выше обсуждение, на первый взгляд, может показаться схоластикой. На самом деле оно имеет прямое отношение к выбору стратегии развития микро-систем в России. С учетом ограниченности средств необходимо совершенствовать основные элементы обеспечения развития. Такими элементами и являются технологические модули микро-системной техники. Набор операций, которые можно проводить на том или ином модуле, определяет материал, из которого могут быть изготовлены детали микро-системы, и набор конструктивных элементов, вы-

полненных из данного материала операциями обработки, на выбранном модуле. Гибкость модуля определяют набор микроциклов обработки и основные методы формирования блоков структуры микросистемы с помощью этих микроциклов. Существенной характеристикой технологического модуля для заказчика служит библиотека компонентов (деталей), которые можно изготовить на данном модуле. Ярким примером может служить неоднократно цитируемая технология объемной многослойной обработки, развитая в Sandia National Laboratory (США) [15], которая позволяет создать элементы шестереночных передач, турбинных колес и т. п. Другим примером является разработка конструктивно-технологического базиса изготовления кремниевых микроэлектромеханических систем в Технологическом центре МИЭТ [16].

Создание различных технологических модулей уже стало обычным для зарубежной практики. Как правило, на их базе создаются так называемые "центры производства", число которых постоянно растет [18]. Однако само по себе создание технологического модуля не решает проблем развития микросистем. Имея технологию и библиотеку конструкций компонентов (т. е. конструктивно-технологический базис) микросистем, необходимо активно предлагать возможности модуля потенциальным заказчикам. Авторы работы [18] видят в этом возможность появления нового типа бизнеса "application hunter" — охотник за приложениями. Именно активность Технологического центра МИЭТ в продвижении своей кремниевой технологии микросистем позволила выйти на заказчиков достаточно крупных серий изделий.

Тенденции развития науки и техники показывают, что ника-

кой преграды между нано-, микро- и макротехникой не существует. Реально совокупность технологий этих областей ближе к сплошному спектру белого света, чем к полосам или линиям характеристического спектра. Продолжая эту "спектральную" аналогию, отметим, что вместе с тем, как было бы не оправданным использование приемников инфракрасного излучения для измерений в ультрафиолетовой области спектра, так не оправданно видеть только общее в принципах развития различных направлений техники. Знание особенностей, отличий каждого направления от других позволяет направленно управлять их развитием на определенном временном интервале. Для микросистемной техники в настоящее время решающим звеном является необходимость создания сети технологических модулей.

Выводы

1. Не существует единой технологии микросистемной техники, позволяющей путем воздействия на материал однотипными операциями создать различные конструкции.
2. В отличие от микроэлектроники микросистемная техника характеризуется, прежде всего, набором технологических, а не конструктивных модулей.
3. Изделия микросистемной техники ориентированы на конкретное применение, т. е. являются заказными. Для каждого изделия должны быть выбраны оптимальные технологические модули.
4. Основой развития микросистемной техники является создание достаточно широкого набора технологических модулей.

Список литературы

1. Mikrotechnik: Deutschland vorn. VDE-Verband benennt die "Schlüsseltechnologien 2010" Die Messe. Nachrichten und Reportagen. München. 12.11.2002. С. 1—3.
2. Вернер В. Д., Пурихванидзе И. А. Микросистемы: проблемы и решения // Микросистемная техника. 2002. № 10. С. 13—18.
3. Pepper J. MEMS roadmaps in U. S. Struggle to chart the right direction // MST news 4/02, 2002. N 4. P. 14—16.
4. Wybranski B. JVEI addresses MicroSystem Technology. Interview with D. Harting, President of ZVEI // MST news. 2002. N 4. P. 46—47.
5. Большая Советская Энциклопедия: Технология. С. 1598; Иллюстрированный энциклопедический словарь. С. 720.
6. National nanotechnology Initiative. Washington D. C. July 2000.
7. Roesems G., Van Caenegem G., Beernaert D. The 6th Framework Programme for European Research and the world Micro & NanoTechnology // MST news. 2002. N 5. P. 35—36.
8. Petersen K. MEMS: What lies ahead? // MST news: special issue USA & Canada. 96. 1996. P. 101—105.
9. Большая Советская Энциклопедия. Модуль. С. 1207; Иллюстрированный энциклопедический словарь. С. 462.
10. Kergel H. Modular Microsystems Update and New Developments // MSTnews 5/01. P. 37—39.
11. Match-X. www.match-x.org
12. Телец В. А., Сергеев В. С., Василевич А. И. Построение трехмерных электронных модулей для микроминиатюрных робототехнических и информационных систем методом объемно-планарного монтажа // Микросистемная техника. 2001. № 5. С. 11—21.
13. Tilmans H. A. C., Baert K., Verbist A., Puers R. CMOS foundry-based micromachining // J. Micromech. Microeng. 1996. N 6. P. 122—127.
14. Mounier E., Provence M. Technologies and markets trends in biochips and microfluidic chips // MST news. 2002. N 5. P. 4—6.
15. Мальцев П. П., Телец В. А., Никифоров Ю. А. Технология и изделия микроэлектромеханики // Микросистемная техника. 2001. № 10. С. 18—24.
16. Шелепин Н. А. Кремниевые преобразователи физических величин и компоненты датчиков. Датчики и микросистемы на их основе // Микросистемная техника. 2002. № 9. С. 2—10.
17. Van Heeren H., Elders I. Foundries for MEMS/MST // MST news. 2002. N 2/02. P. 41—43.
18. Berger J., Bothhof A. Technology Developments and Market Exploitation in Context of Microsystems // MST news. 2002. N 4.
19. Walker S. J., Nagel D. J. Optics & MEMS. Nowak Research Laboratory, Washington DC 20375 — 5320, May 15, 1999. P. 1.

1. Mikrotechnik: Deutschland vorn. VDE-Verband benennt die "Schlüsseltech-

Л. Н. Сафронов, канд. физ.-мат. наук,
М. А. Ильницкий,
Институт физики полупроводников СО РАН,
г. Новосибирск
Safronov@isp.nsc.ru

СВОЙСТВА ДЕФЕКТОВ В НАНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ И СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛОВ С ДЕФЕКТАМИ

Показано наличие конфигурационных переходов простейших дефектов в нанокристаллах при гидростатическом сжатии (растяжении). Обнаружено, что значение скачка объемного модуля сжатия, обусловленного конфигурационным переходом дефекта, обратно пропорционально числу атомов в нанокристалле.

Введение

При формировании нанокластеров для различных технических применений используются такие технологические приемы как химическое и ионное травление, окисление, термообработки и другие, которые могут приводить к инъекции простейших дефектов в нанокристаллы.

Вследствие близости поверхности точечные дефекты имеют существенно измененные характеристики. Например, согласно расчетам [1] энергия образования вакансии вблизи поверхности отличается от энергии ее образования в объеме монокристалла. Это приводит к заметным отличиям равновесных концентраций дефектов, а также параметров самодиффузии и диффузии примесей в нанокристаллах от объемных.

Вместе с тем, вследствие большого вклада поверхностной фазы отклик нанокристаллов на внешние воздействия (например, на приложение давления) должен отличаться от отклика больших кристаллов [2]. Само по себе наличие даже одиночного дефекта должно заметно влиять на свойства нанокристалла, например на его сжимаемость, причем, чем меньше размеры нанокристалла, тем в большей степени его свойства определяются дефектами.

Деформации кристалла изменяют межатомные расстояния и, если эти деформации достаточно велики, то в силу нелинейного характера потенциала взаимодействия атомов следует ожидать скачкообразного изменения конфигурации дефектов при одноосном или гидростатическом сжатии (растяжении).

В представленной работе проанализированы вопросы образования дефектов в нанокристаллах

кремния и влияние этих дефектов на упругие свойства нанокристаллов.

Модель для расчета

Поскольку даже малые кластеры содержат около 10^3 — 10^4 атомов, то для расчетов выбрана модель кремния, в которой взаимодействие между атомами описывается эмпирическим потенциалом. Из множества предложенных потенциалов [3], были использованы потенциалы Терсофа (в реализациях T2 [4], или T3 [5]), поскольку они удовлетворительно описывают дефектные конфигурации с большим отклонением атомов от их регулярного положения в решетке. В качестве примера можно сослаться на расчеты, приведенные в работе [6], взаимодействия водорода с димеризованной поверхностью кремния.

Основная часть расчетов энергии связи атомов в кластерах заданной конфигурации выполнена с использованием модифицированного нами потенциала T2. В своих расчетах мы исключили нефизическую функцию обрезания, которая в потенциале Терсофа обеспечивает учет порядка связи, а учет ближайших соседей проводили с использованием указателей на атом и определенных правил отбора. Конфигурацию кластера с максимальной энергией связи находили методом градиентного спуска.

Поверхность

В нанокристаллах поверхность является неизбежным дефектом, и ее вклад в свойства нанокристалла растет с уменьшением размера кристаллита. Мы моделировали свойства нанокристаллов, представляющих собой куб, ограниченный (100) поверхностями различных типов:

- пассивированной (оборванные связи не взаимодействуют друг с другом, например, насыщены водородом);
- фиксированной (поверхностные атомы неподвижны, что соответствует случаю, когда связи замыкаются на жесткую матрицу, например SiO_2);
- реконструированную (димеризованную), когда оборванные связи на поверхности замыкаются с соседями второй координационной сферы, образуя димеры.

Различные типы поверхностей по-разному и релаксируют, что выражается в изменении энергии связи приповерхностных атомов в пределах приблизительно трех монослоев и, следовательно, значения поверхностного натяжения. Результаты расчета поверхностной энергии для разной огранки кристаллов и при различных условиях на поверхности приведены в таблице.

Энергии образования дефектов

Энергия образования дефекта E_f представляет разницу энергий бездефектного кристаллита и кри-

Значение поверхностного натяжения (Дж/м²)
для различных поверхностей кремния

Ориентация поверхности	Тип поверхности		
	Свободная	Фиксиро- ванная	Димеризо- ванная
(100)	2,218	2,217	1,248
(110)	1,112	1,128	—
(111)	0,907	0,908	—

сталлита с дефектом E_{Bond} за вычетом энергии атома, участвующего в образовании дефекта E_A , и энергии упругой релаксации кристаллита вокруг дефекта (E_{Relax}) (см., например [7]):

$$E_f = E_{\text{Bond}} - E_A - E_{\text{Relax}},$$

где E_A — энергия когезии (для кремния 4,63 эВ [4, 5]), если при образовании вакансии атом выносится на бесконечность, и E_A — энергия поверхностного атома, если дефект образуется по механизму Шоттки.

В данной работе считается, что энергия E_A , выделяющаяся при осаждении атома на поверхность кристаллита, равна по абсолютному значению энергии, необходимой для удаления атома с центра поверхности. Расчеты показали, что для удаления атома со свободной поверхности кремния (100) необходима энергия 3,0 эВ, с закрепленной поверхности — 4,0 эВ и с реконструированной — 4,1 эВ, т. е. энергия образования дефекта по Шоттки для кристаллитов с различными типами поверхностей отличается даже в случае больших кристаллитов.

Одиночная вакансия является порой минимального размера в кристалле. Из-за нелинейного характера взаимодействия атомов внутренней полости возможно бистабильное поведение нанокристалла с порой в поле упругих напряжений.

Расчеты показывают, что вакансия в нанокристалле кремния может существовать в двух формах (рис. 1):

- *стянутая* — внутренние атомы вакансии релаксируют навстречу друг другу, уменьшая объем полости;
- *растянутая* — внутренние атомы вакансии релаксируют, отдаляясь друг от друга, увеличивая объем полости.

Первая форма доминирует при нулевом и положительном гидростатическом сжатии. Вторая форма предпочтительна в гидростатически растянутых кристаллах.

На рис. 2 приведена зависимость энергии образования по Шоттки вакансии (стянутой) от раз-

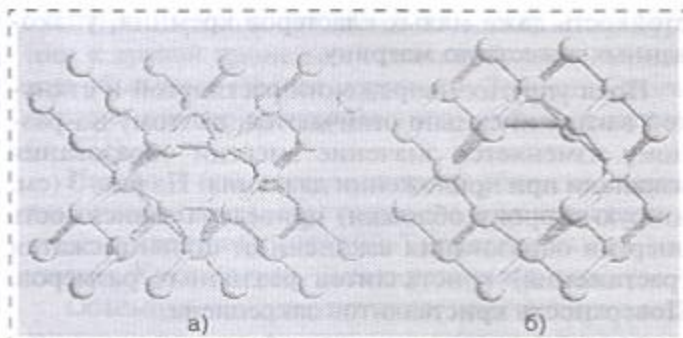


Рис. 1. Область искажений стянутой (а) и растянутой (б) вакансии (изображены только те атомы, у которых длина связи по абсолютному значению отличается от длины связи идеальной решетки более, чем на 0,5 %)

мера кристаллита при различных условиях на поверхности.

Видно, что в нанокристаллах с числом атомов менее 10^4 энергия образования вакансии заметно отличается от энергии образования вакансии в объемном кристалле кремния. Интересно, что в случае реконструированной поверхности малые нанокристаллы (менее 300 атомов в кристаллите) имеют отрицательную энергию образования вакансии, т. е. такие кластеры кремния нестабильны в структуре алмаза. На нестабильность таких малых кластеров кремния указывают и расчеты нанокристаллов, выполненные методом сильной связи [8]. Обратная ситуация складывается для вакансий в нанокристаллах кремния, жестко закрепленных в матрице, например в SiO_2 . Энергия образования вакансии в таких нанокристаллах не снижается с уменьшением размера. Это указывает на повышенную

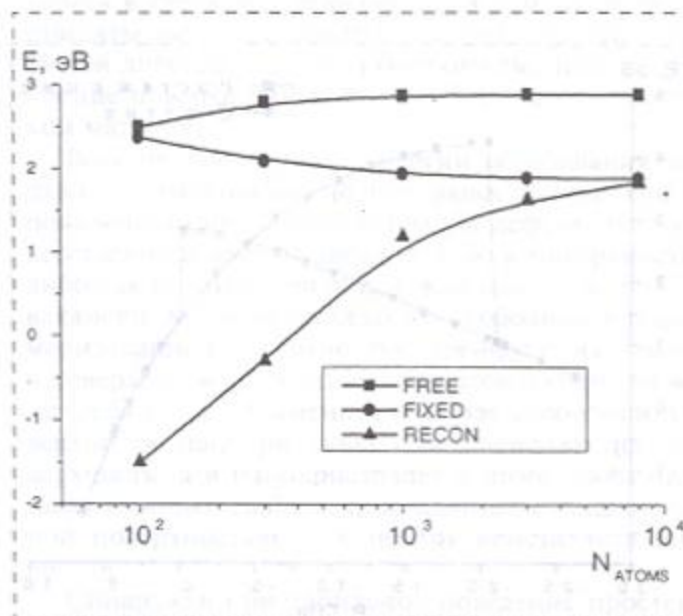


Рис. 2. Зависимость энергии образования вакансии (стянутой) по Шоттки от размера нанокристалла. Приведены расчеты для различных условий на поверхности

стойкость даже малых кластеров кремния, упакованных в жесткую матрицу.

Поля упругих напряжений растянутой и стянутой вакансий сильно отличаются, поэтому по-разному изменяется значение энергии образования вакансий при приложении давления. На рис. 3 (см. вторую сторону обложки) приведена зависимость энергии образования вакансий от степени сжатия (растяжения) кристаллитов различных размеров. Поверхность кристаллитов закреплена.

В растянутом кристаллите образуется растянутая вакансия и по мере увеличения растяжения энергия образования данного дефекта почти линейно падает. При определенной степени сжатия (для больших кристаллитов — 0 %, для малых кристаллитов порядка — 1 %) наблюдается скачок по энергии, что соответствует переходу растянутой вакансии в стянутую. По мере увеличения степени сжатия кристаллита энергия образования стянутой вакансии почти линейно уменьшается, при этом, чем больше кристаллит, тем больше наклон.

Статическое моделирование показало, что стянутая вакансия, образовавшаяся в исходно сжатом кристаллите, при больших растяжениях (отрицательное давление около 20 ГПа) спонтанно переходит в растянутую конфигурацию (рис. 4). И наоборот, растянутая вакансия, возникшая в исходно растянутом кристаллите, вблизи нулевого давления переходит в стянутую конфигурацию. На самом деле при повышенной температуре и давлениях более 5 ГПа должны образовываться преимущественно стянутые вакансии (вследствие меньшей энергии образования), а при более низких давлениях образующиеся вакансии в основном имеют растя-

нутую конфигурацию. Вблизи этой критической точки обе конфигурации имеют близкие значения энергии образования и соответственно близки вероятности их возникновения.

Качественно поведение многовакансионных кластеров при гидростатических нагрузках не отличается от поведения одиночных вакансий в кремнии, хотя критические давления для конфигурационных переходов получаются другие.

В данной работе моделировалось междоузлие, расщепленное в направлении (100). На врезке рис. 5 (см. вторую сторону обложки) показана область упругих искажений вблизи данного дефекта. Энергия образования по Шоттки междоузлия различна для разных типов поверхностей так же, как и в случае вакансий. Соответствующие зависимости энергии от размеров кристаллита приведены на рис. 5.

Гидростатическое сжатие (растяжение) также оказывает существенное влияние на энергию образования междоузлий. На рис. 6 приведена зависимость энергии образования междоузлия от степени сжатия (растяжения) кристаллитов различных размеров. Поверхность кристаллитов была закреплена.

Энергия образования междоузлия линейно растет по мере сжатия кристалла. Для кристаллитов, содержащих меньше 1000 атомов, при некотором критическом сжатии междоузлие изменяет свою структуру. При этом, чем меньше кристаллит, тем ниже значение критического сжатия.

С уменьшением размера кристаллита снижается энергия релаксации. Поэтому, когда малый кристаллит подвергается сжатию, междоузлие, расще-

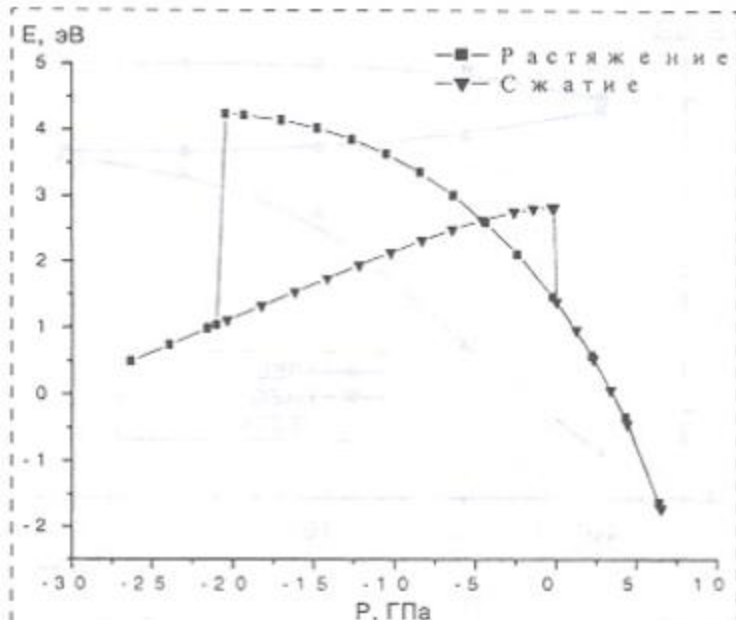


Рис. 4. Зависимость энергии образования вакансии в цикле растяжения—сжатия нанокристалла

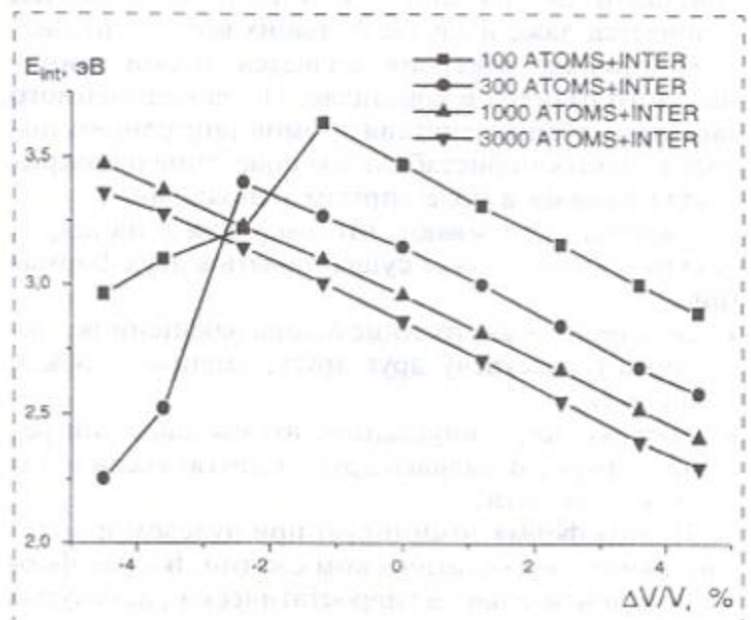


Рис. 6. Зависимость энергии образования междоузлия от степени сжатия (растяжения) нанокристалла

пленное в направлении (100), сильно напряжено и ему приходится перестроиться в более выгодную конфигурацию. Как показало детальное изучение, перестроенное междоузлие имеет гантельную конфигурацию.

Объемный модуль упругости нанокристаллов с дефектами

Значение объемного модуля упругости рассчитывалось по выражению $B = -V \frac{\partial^2 U}{\partial V^2}$ [9] числен-

ным дифференцированием зависимости полной энергии кристаллита U от его объема при растяжении (сжатии).

Атомы, отклоненные от идеального положения в кристаллической решетке, создают дополнительные силовые поля, что ведет к изменению упругих свойств всего кристалла. Поверхность кристалла сама является дефектом. Релаксация приповерхностных атомов изменяет жесткость кристаллита в этой области, поэтому сжимаемость нанокристаллов зависит от состояния их поверхности и размеров нанокристалла так, как показано на рис. 7.

Вакансии и вакансионные агрегаты создают внутренние поверхности, которые также изменяют жесткость кристалла. На рис. 8 (см. вторую сторону обложки) приведена зависимость объемного модуля упругости от степени сжатия (растяжения) кристаллитов разного размера, содержащих одиночную вакансию.

Объемный модуль упругости кристаллита с вакансией по мере увеличения сжатия линейно рас-

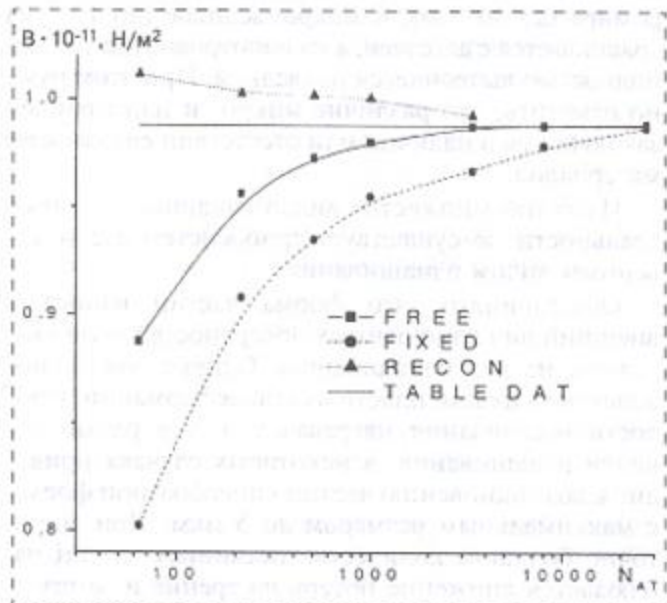


Рис. 7. Зависимость объемного модуля упругости от размера нанокристалла для нанокристаллов с различным состоянием поверхности (100)

тет. При переходе вакансии от одной конфигурации к другой происходит скачкообразное изменение объемного модуля упругости. Значение скачка обратно пропорционально числу атомов в системе ($\propto N^{-1}$).

На рис. 9 (см. вторую сторону обложки) приведена зависимость объемного модуля упругости от степени сжатия (растяжения) кристаллита с междоузлем. Кристаллиты имеют различные размеры.

Объемный модуль упругости кристаллита с междоузлем по мере увеличения сжатия линейно растет. При переходе междоузлия от одной конфигурации к другой происходит скачкообразное изменение объемного модуля упругости. Зависимость значения скачка модуля для кристаллитов с междоузлем от числа атомов в системе имеет тенденцию к насыщению ($\propto N^{-0.75}$).

Выводы

В представленной работе изучено влияние поверхности на свойства нанокристаллов и дефектов в них. Это влияние становится существенным в кристаллитах, содержащих менее 10^4 атомов (т. е. в объектах с характерным размером менее 20 монослоев).

Показано, что в зависимости от состояния поверхности значения энергии образования простейших дефектов в нанокристаллах кремния могут отличаться от объемных значений как в меньшую, так и в большую сторону. В частности, кристаллические объекты с минимальным размером менее семи монослоев неустойчивы по отношению к захвату вакансии и, следовательно, не могут существовать в структуре решетки типа алмаза, если не приняты меры к стабилизации поверхности (требуется либо пассивация поверхности, либо закрепление поверхностных атомов в достаточно жесткой матрице).

Вообще зависимость энергии образования дефекта от расстояния до поверхности приводит к появлению сил, действующих на дефект, и соответственно к дрейфу дефекта либо к поверхности, либо в объем нанокристалла. Как следует из рис. 2, вакансии в нанокристаллах со свободной или димеризованной поверхностью дрейфуют из объема к поверхности. Междоузельные атомы кремния ведут себя иначе. А именно, в случае свободной поверхности нанокристалла они дрейфуют на поверхность, а в нанокристаллах с димеризованной поверхностью, либо в кристаллитах с закрепленной поверхностью — к центру кристаллита (см. рис. 5).

Обнаружено бистабильное поведение простейших дефектов и их агрегатов в полях упругих напряжений. Конфигурационные трансформации дефектов при механических воздействиях изменя-

ют не только упругие свойства нанокристалла, но и влияют на его электрофизические свойства, поскольку дефекты различной конфигурации должны иметь разную систему уровней в запрещенной зоне полупроводника.

Список литературы

1. Tersoff J. Enhanced solubility of impurities and enhanced diffusion near crystal surfaces // Phys. Rev. Lett. 1995. В 74. 5080.
2. Segall D. E., Arias T. A. Elasticity of nanometer-sized objects // Phys. Rev. 2002. В 65. 214109.

3. Balamane H., Halicioglu T., Tiller W. A. Comparative study of silicon empirical interatomic potentials // Phys. Rev. 1992. В 46. 2250.
4. Tersoff J. New empirical approach for the structure and energy of covalent systems // Phys. Rev. 1988. В 37. 6991.
5. Tersoff J. New empirical model for silicon with improved elastic properties // Phys. Rev. 1988. В 38. 9902.
6. Ramana Murty M. V., Atwater H. A. Empirical interatomic potential for Si—H interactions // Phys. Rev. 1998. В 57. 13295.
7. Герузин Я. У. Диффузионная зона. М.: Наука, 1979. 344 с.
8. Yu D. K., Zhang R. Q., Lee S. T. Structural transition in nanosized silicon clusters // Phys. Rev. 2002. В 65. 245417.
9. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 792 с.

УДК 681.586

Е. В. Шалобаев, канд. техн. наук, доц.
Санкт-Петербургский государственный
институт точной механики и оптики
(технический университет)

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ ТРИБОЛОГИИ

Рассмотрены тенденции развития современной трибологии на микро- и наноуровнях, указаны проблемы и направления их решений, а также их взаимосвязь с традиционной трибологией.

В современной трибологии наблюдается тенденция перехода к моделям, рассматривающим контакт на микро- и нанометровом уровнях [1, 2].

С одной стороны, трибология появилась из недр классической механики и использует ее методы, результаты и подходы, а с другой — стимулирует интерес механиков к так называемым неклассическим задачам, адекватным условиям реального контакта — с учетом дискретности и поверхностных сил.

Общая тенденция к миниатюризации [3, 4] настоятельно требует для моделей фрикционного контакта перехода от рассмотрения объемных свойств материала к изучению их поверхностных свойств, оцениваемых по данным микро- и наноиндентирования.

Основной проблемой остается физическая интерпретация экспериментальных данных при изменении масштаба измерения, поскольку в зависимости от избранного уровня такие характеристики, как модуль Юнга и твердость, могут отличаться не только по величине, но и по физическому смыслу [1].

При этом следует иметь в виду, что при взаимном скольжении твердых тел механические свойства контактирующих материалов могут изменяться под действием теплоты, генерируемой при трении. Хотя существуют многочисленные теории,

позволяющие рассчитать объемную и поверхностную температуры и температуру вспышки, но механизм генерирования теплоты остается, по существу, не очень ясным. И здесь определенные перспективы можно связать с моделями нанотрибологии, описывающими процессы возникновения и разрушения молекулярных фрикционных связей.

Такой переход заставляет механиков подвергать ревизии физические основы своей науки, формулируя задачи на стыке молекулярной и статической физики, проливает свет на фундаментальные проблемы трибологии, такие как связь между адгезионными и деформационными механизмами трения [2].

Условно тенденция может быть выражена так. При переходе от макро- к наномодели снижается влияние механических свойств и топографии, повышается влияние таких факторов, как поверхностные силы и выделение тепла. В моделях же трения влияние деформаций, доминирующее в макромире (до 10^{-3} м), в микромасштабе (до 10^{-6} м) сравнивается с адгезией, а на наноуровне (до 10^{-9} м) полностью вытесняется последней. При этом нужно отметить, что различие микро- и наноуровней заключается в наличии или отсутствии сплошности материалов.

Известно множество видов изнашивания, но в реальности не существует трибосистем с единственным видом изнашивания.

Общепринято, что форма частиц износа и внешний вид изношенных поверхностей ясно указывают на вид изнашивания. Однако совместное действие адгезии, пластической деформации, усталости, отслаивания, нагрева и т. д., т. е. различных видов изнашивания, в некоторых случаях приводит к возникновению частиц яйцеобразной формы с максимальным размером до 5 мкм. При достаточно большом количестве указанных частиц наблюдается снижение потерь на трение и замедление процесса изнашивания. И если при этом проводится замена смазки, то вначале фиксируется повышение износа соприкасающихся поверхно-

ют не только упругие свойства нанокристалла, но и влияют на его электрофизические свойства, поскольку дефекты различной конфигурации должны иметь разную систему уровней в запрещенной зоне полупроводника.

Список литературы

1. Tersoff J. Enhanced solubility of impurities and enhanced diffusion near crystal surfaces // Phys. Rev. Lett. 1995. **74**. 5080.
2. Segall D. E., Arias T. A. Elasticity of nanometer-sized objects // Phys. Rev. 2002. **65**. 214109.

3. Balamane H., Halicioglu T., Tiller W. A. Comparative study of silicon empirical interatomic potentials // Phys. Rev. 1992. **46**. 2250.
4. Tersoff J. New empirical approach for the structure and energy of covalent systems // Phys. Rev. 1988. **37**. 6991.
5. Tersoff J. New empirical model for silicon with improved elastic properties // Phys. Rev. 1988. **38**. 9902.
6. Ramana Murty M. V., Atwater H. A. Empirical interatomic potential for Si—H interactions // Phys. Rev. 1998. **57**. 13295.
7. Герузин Я. У. Диффузионная зона. М.: Наука, 1979. 344 с.
8. Yu D. K., Zhang R. Q., Lee S. T. Structural transition in nanosized silicon clusters // Phys. Rev. 2002. **65**. 245417.
9. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 792 с.

УДК 681.586

Е. В. Шалобаев, канд. техн. наук, доц.
Санкт-Петербургский государственный
институт точной механики и оптики
(технический университет)

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ ТРИБОЛОГИИ

Рассмотрены тенденции развития современной трибологии на микро- и наноуровнях, указаны проблемы и направления их решений, а также их взаимосвязь с традиционной трибологией.

В современной трибологии наблюдается тенденция перехода к моделям, рассматривающим контакт на микро- и нанометровом уровнях [1, 2].

С одной стороны, трибология появилась из недр классической механики и использует ее методы, результаты и подходы, а с другой — стимулирует интерес механиков к так называемым неклассическим задачам, адекватным условиям реального контакта — с учетом дискретности и поверхностных сил.

Общая тенденция к миниатюризации [3, 4] настоятельно требует для моделей фрикционного контакта перехода от рассмотрения объемных свойств материала к изучению их поверхностных свойств, оцениваемых по данным микро- и наноиндентирования.

Основной проблемой остается физическая интерпретация экспериментальных данных при изменении масштаба измерения, поскольку в зависимости от избранного уровня такие характеристики, как модуль Юнга и твердость, могут отличаться не только по величине, но и по физическому смыслу [1].

При этом следует иметь в виду, что при взаимном скольжении твердых тел механические свойства контактирующих материалов могут изменяться под действием теплоты, генерируемой при трении. Хотя существуют многочисленные теории,

позволяющие рассчитать объемную и поверхностную температуры и температуру вспышки, но механизм генерирования теплоты остается, по существу, не очень ясным. И здесь определенные перспективы можно связать с моделями нанотрибологии, описывающими процессы возникновения и разрушения молекулярных фрикционных связей.

Такой переход заставляет механиков подвергать ревизии физические основы своей науки, формулируя задачи на стыке молекулярной и статической физики, проливает свет на фундаментальные проблемы трибологии, такие как связь между адгезионными и деформационными механизмами трения [2].

Условно тенденция может быть выражена так. При переходе от макро- к наномодели снижается влияние механических свойств и топографии, повышается влияние таких факторов, как поверхностные силы и выделение тепла. В моделях же трения влияние деформаций, доминирующее в макром мире (до 10^{-3} м), в микромасштабе (до 10^{-6} м) сравнивается с адгезией, а на наноуровне (до 10^{-9} м) полностью вытесняется последней. При этом нужно отметить, что различие микро- и наноуровней заключается в наличии или отсутствии сплошности материалов.

Известно множество видов изнашивания, но в реальности не существует трибосистем с единственным видом изнашивания.

Общепринято, что форма частиц износа и внешний вид изношенных поверхностей ясно указывают на вид изнашивания. Однако совместное действие адгезии, пластической деформации, усталости, отслаивания, нагрева и т. д., т. е. различных видов изнашивания, в некоторых случаях приводит к возникновению частиц яйцеобразной формы с максимальным размером до 5 мкм. При достаточно большом количестве указанных частиц наблюдается снижение потерь на трение и замедление процесса изнашивания. И если при этом проводится замена смазки, то вначале фиксируется повышение износа соприкасающихся поверхно-

стей и увеличение потерь на трение. Последнее, якобы парадоксальное, явление объясняется появлением наряду с трением скольжения трения качения. Кроме того, впадины микрорельефа играют роль ловушек для твердых частиц износа и определяют способность удерживать эти частицы, локализуя их действие и снижая износ. Механизм же образования указанных выше частиц пока неясен и, наверное, также связан с решением задачи на микро- и наноуровнях.

Контакт твердых тел и трение реализуются на микроскопически малых участках реальных площадей контактов, но только, начиная с 1970-х годов, трибологи столкнулись с проблемами трения и износа на микроуровне. Это произошло в результате бурного развития компьютерной техники, потребовавшей создания устройств записи, хранения и обработки информации на магнитных носителях памяти [1].

Развитие техники затронуло много других областей, где контроль трения и износа в микро- и наномасштабе стал необходимостью. Новая область трибологии, определяемая сейчас как микро- и нанотрибология, стала основой разработки нового класса приборов — МЭМС, и новой области микросистемных технологий. Микросистема определяется как миниатюрный прибор [2], сочетающий функции датчика, преобразователя сигнала и исполнительного механизма, т. е. мехатронный объект на микроуровне [3]. Трение, смазка и износ в микросистемах реализуются на очень гладких площадках контакта, соизмеримых с размерами самих систем, и поэтому роль адгезии и поверхностных сил в них очень велика.

Поскольку микроэлектронные технологии основаны на использовании кремния и его оксидов, механические и трибологические характеристики которых очень низки, это требует применения специальных сверхтонких покрытий или методов модификации поверхностного слоя, например, ионной имплантации.

При этом необходимо напомнить, что метод регуляризации микрорельефа, предложенный проф. Ю. Г. Шнейдером [1, 5, 6] и дающий в макромире эффект резкого снижения трения и износа, имеет ряд ограничений по применению — в частности, это хрупкие, непластичные материалы, пленки, кристаллы.

Для замены используемого процесса вибронакатывания предлагается применять лазерное микроstructuring поверхностей материалов, используемых в МЭМС [6].

Кроме того, лазерное микроstructuring, основанное на местном испарении материала, можно использовать и для решения задач по снижению трения и износа в макромире. Так, для структурированных поверхностей наблюдается повышение срока их эксплуатации в 8 раз, благодаря

образованию микропор [6], которые сохранялись и после завершения эксплуатации. Форма и размер неровностей — взаимосвязанные характеристики поверхности, поэтому для повышения износостойкости предложено использовать сетку достаточно глубоких кратеров, которые будут играть роль и маслосъемных карманов и ловушек для продуктов изнашивания. Такой подход был реализован в работе [7]. Кстати, роль подобных карманов играют полости микропор в микромеханических устройствах, отверстия в которых имеют звездообразную форму вместо традиционной цилиндрической в макромире [3].

В механике уже давно был замечен эффект резкого возрастания трения при уменьшении нагрузки до 30 Н, что учитывалось эмпирическим коэффициентом Понселе. Недавно был зарегистрирован еще один эффект — резкое (на порядок и более) увеличение трения при увеличении длины трибопары всего в 1,5 раза [8]. Однако механизм этого явления [9] полностью до сих пор не ясен. Переход к микро- и наномоделям трения должен дать ответ на указанные выше вопросы.

В заключение необходимо отметить, что микро- и нанотехнологии будут продолжать бурно развиваться в XXI веке на базе таких достижений науки, как сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия, новые технологии и материалы. Дальнейшее развитие современных технологий невозможно без использования достижений механики контактов, теории адгезии и граничной смазки, т. е. разделов традиционной трибологии.

Из всего изложенного выше можно заключить, что новые разделы трибологии, связанные с микро- и наноуровнями, иллюстрируют прекрасные возможности старой, как мир, науки в эпоху новых технологических возможностей, в частности, в области микросистемной техники.

Список литературы

1. Петроковец М. И., Мышкин Н. К., Чижик С. А. // Трение и износ. 1997. № 2. Т. 18. С. 147—154.
2. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трибология. Принципы и приложения. Гомель: Изд-во ИММС НАН Б, 2002. 310 с.
3. Шалобаев Е. В. Микросистемная техника и мехатроника: особенности соотношения микро- и макроуровней // Микросистемная техника. 2000. № 4. С. 5—9.
4. Шалобаев Е. В. Проблемы микросистемной техники и XXI век // Микросистемная техника. 2001. № 3. С. 37—38.
5. Шнейдер Ю. Т. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. СПб.: ИТМО, 2001. 120 с.
6. Вейко В. П., Дышловченко С. С. Лазерное микроstructuring поверхностей // Научно-технический вестник СПбГТИО (ТУ). 2001. № 4. С. 119—129.
7. Weber H. R. Laser microstructuring of surface for improving their tribological performance // Proc. SPIE. V. 4157. Laser-assisted Microtechnology. 23—25 August 2000. P. 105—112.
8. Шалобаев Е. В., Петров С. Ю., Шапошников М. М., Громова С. В. Проблемы лентопротяжного механизма мехатронного устройства // Материалы Межвузовской конференции: 28-я неделя науки в СПбГТУ. В 5 частях. Ч. 2. СПб.: ГТУ, 2000. С. 30—31.
9. Мусалимов В. М., Лертунгуранг К. Бифуркации в механизмах // Известия вузов. Приборостроение. 2002. № 2. С. 36—46.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 543.46

К. А. Валиев, акад. РАН, В. А. Кальнов, канд. техн. наук,
А. П. Кириянов, канд. физ.-мат. наук,
П. П. Мальцев*, д-р техн. наук, проф.
Физико-технологический институт РАН, г. Москва,
*МИРЭА, г. Москва

ОПТИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОМЕХАНИКЕ

Рассмотрен метод оптической интерферометрии применительно к созданию чувствительных элементов микросистемной техники на основе использования подвижных дифракционных решеток.

Введение

Оптическая интерферометрия применяется в науке и технике как эффективное средство изучения и контроля физико-химических свойств материалов, используемых в различных технологических процессах и системах [1, 2]. Известны также достижения интегральной микромеханики на основе развитой в микроэлектронике кремниевой технологии [3, 4].

Интеграция этих направлений наукоемких технологий открывает возможности создания нового класса контрольно-диагностической аппаратуры, удовлетворяющей специальным требованиям и условиям ее применения. Пользователь аппаратуры заинтересован в ее эффективном и недорогом использовании при решении специальных задач. Специализация контрольно-измерительной аппаратуры позволяет удовлетворить такой практический интерес. В эту сферу включается, в частности, проблема создания систем навигации и управления на основе интерферометрических интегральных акселерометров в миниатюрном исполнении.

Основы феноменологического подхода

Использование оптических методов и средств основано на взаи-

модействии светового потока с материальным объектом, когда наблюдаются вызванные взаимодействием изменения светового потока, которые регистрируются в эксперименте [5–9]. Результатирующее при этом волновое возмущение в среде, являющееся непрерывной суммой парциальных волн в виде интеграла Фурье [5–9], может быть аппроксимировано, согласно теореме Котельникова [10], конечной дискретной суммой Фурье. Для нее число слагаемых (точек отсчета) равно числу N разрешаемых элементов фазового пространства, которое, в свою очередь, определяется реализуемым при измерениях отношением сигнала к шуму $W(S/N)$. Интенсивные потоки лазерного излучения и фотоприемники высокой чувствительности позволяют иметь такие отношения (S/N) на уровне 10^{10} – 10^{11} . Это обстоятельство и делает использование оптики привлекательным для интегральной микромеханики.

Интеграция оптики и микромеханики

Явление дифракции волн, в частности, электромагнитных и их частного случая — световых волн, представляется как суммарный эффект модуляции неоднородностями среды параметров волно-

вого поля — амплитуды и фазы волны. Изучение особенностей результата такой модуляции позволяет судить о волновых свойствах неоднородностей. Точность решения этой обратной задачи существенно возрастает, если неоднородности образуют периодическую многоэлементную структуру, каковой является, в частности, дифракционная решетка, обеспечивающая амплитудную, фазовую, или одновременно амплитудную и фазовую модуляцию падающего потока волн.

В традиционной волновой оптике используется явление дифракции на решетках для создания высокоразрешающих и высокочувствительных дифракционных спектрометров. С помощью лазерной техники реализуются выдающиеся спектрометрические возможности оптических перестраиваемых резонаторов Фабри–Перо [10].

Достижения интегральной микромеханики на основе использования кремниевой технологии микроэлектроники позволили создать миниатюрные интегральные спектрометры с достаточным для практических приложений, например, в биохимической аналитике с высоким спектральным разрешением [11], где дифракционная решетка была получена на подложке из кварца толщиной 0,6525 мм, щели шириной 0,4 мкм вытравливались ионным пучком; решетка закрывалась пленкой хрома толщиной 50 нм.

Трехступенчатая фазовая решетка получалась с помощью стандартной техники фотолитографии в фоторезисте толщиной 400 нм, при этом решетка имела щели шириной 0,5 мкм, период — 1,5 мкм и глубину канавок 0,63 мкм. Эффективность фазовой решетки составила 63 % при работе с гелиевым лазером на

длине волны 632,8 нм. С целью обеспечения высокой чувствительности и дисперсии при работе под большими углами дифракции использовался плоский модульный блок, состоящий из 512×64 зарядосвязанных фотоприемников размерами 27×27 мкм (рис. 1).

В работе [12] описан дифракционный спектрометр, состоящий из двух независимых пластинок (рис. 2), при этом первая пластинка содержала дифракционную решетку, а вторая — ячейку термопарных приемников. Решетка содержала 60 щелей с периодом 4 мкм, ширина каждого из 16 фотоприемников составляла 100 мкм, диапазон длин волн от 1 до 9 мкм. Возможны и другие методы создания микроспектрометров в кристалле (рис. 3, см. четвертую сторону обложки) [13].

Лабораторный вариант интегрального акселерометра [13] выполнен в виде вставленных друг в друга двух решеток, закрепленных соответственно на массивной станине и подвижной опоре, которая могла приводиться в движение пьезоэлектрическим генератором с резонансной частотой $f \approx 650$ Гц. Дифракционная картина получалась при отражении от решеток излучения лазерного диода с длиной волны $\lambda = 635$ нм при

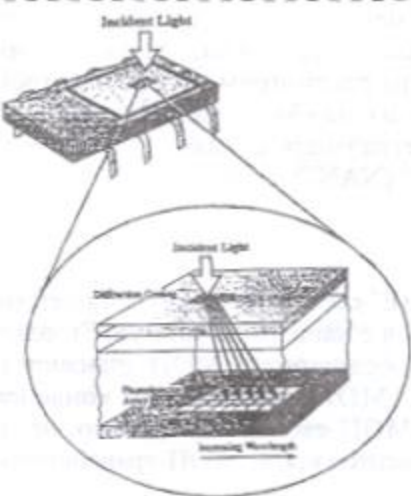


Рис. 1. Миниатюрный интегральный спектрометр

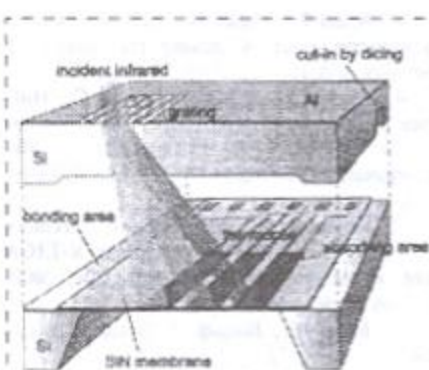


Рис. 2. Интегральный ИК спектрометр

мощности излучения $W = 1$ мВт, она наблюдалась в дальней волновой зоне в виде серии дифракционных пучков (рис. 4). Регистрация излучения проводилась с помощью кремниевого фотодиода, при этом ток с него преобразовывался в напряжение с помощью резистора с сопротивлением 10 кОм, напряжение усиливало и поступало на спектроанализатор механических гармоник, регистрируемых в диапазоне 600...700 Гц. Зарегистрированный отклик на частоте 650 Гц показан на рис. 5. Оценка эффективного ускорения элемента подвижной дифракционной решетки при его возбуждении пьезоэлектрическим генератором показывает, что данное устройство чувствует ускорение $a = 2 \cdot 10^{-6} g$, где g — ускорение свободного падения ($g = 10$ м/с²). Расчет шумового эквивалентного ускорения согласно формуле:

$$a_{\text{шум}} = (4k_B T \omega_p / m Q)^{1/2},$$

где k_B — константа Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/моль · К; T — температура среды; ω_p — резонансная частота; m — масса пробного тела; Q — добротность механического резонатора, причем $Q \approx 90$ дает предельно регистрируемое ускорение $a_{\text{пр}}$ порядка $90 \cdot 10^{-9}$ или $a_{\text{пр}} \approx 0,9 \cdot 10^{-6}$ м/с².

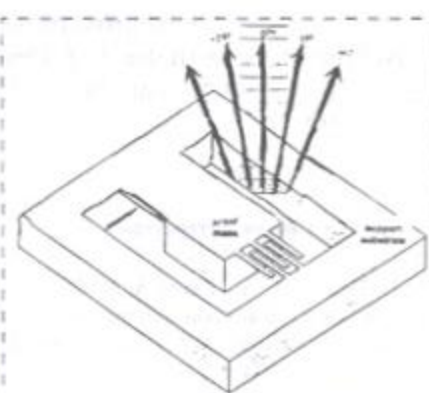


Рис. 4. Интегральный интерференционный акселерометр

Отметим также, что при периоде дифракционной решетки $d = 6$ мкм, освещаемой излучением с длиной волны $\lambda = 635$ нм, минимальная длина до фотодетектора составляла $L = 1$ мм. Это позволило собрать акселерометр в объеме не больше 10 см^3 . Это значит, что проблема миниатюризации сверхчувствительных интегральных акселерометров на основе использования техники оптической интерферометрии вполне разрешима.

Большое внимание уделяется разработке математических моделей функционирования интегральных дифракционных решеток и отладке методики сопоставления результатов моделирования и реальных экспериментов [Bowler M. A./NIMPR, A 467-468 (2001)], а также возможности применения техники матриц

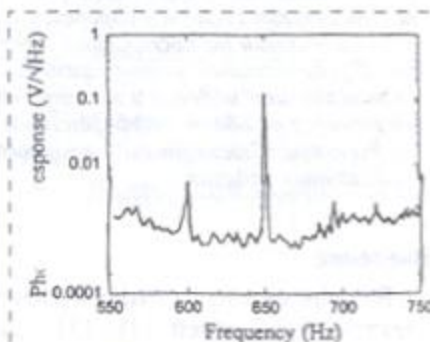


Рис. 5. Регистрируемый сигнал с интегрального интерференционного акселерометра

Джонса к оптическим интегральным устройствам [Belea A. J. Optics (Paris), 1992. Vol. 23. N 1. P. 19—26].

Список литературы

1. Валиев К. А., Раков А. В. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике. М.: Радио и связь, 1984.
2. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. 581 с.
3. Ayazi F., Najafi K. High aspect ratio polysilicon micromachining technology // Sensors & Actuators. 2000. V. 87. P. 46—51.
4. McNie M., King D., Vizard C., Holmes A., Lee K. W. High aspect ratio micromachining (HARM) technologies // Microsystem technologies. 2000. V. 6. P. 184—188.
5. Kupka R. K., Bouamrane F., Cremers C., Megtert S. Microfabrication: X-LIGA and application // Appl. Surf. Sci. 2000. V. 164. P. 97—100.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Наука, 1972.
7. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Оптика М.: Наука, 1980.
8. Goodman J. W. Introduction to Fourier Optics / VcGraw-Hill. N.-Y., 1996.
9. Хинчин Спектры и анализ М.: Наука, 19
10. Yee G. V., Maluf N. I., Albin M., Kovacs G. T. A. Miniature spectrometers for biochemical analysis // Sensor&Actuators A. 1997. V. 58. P. 61—66.
11. Kong S. H., Wijngards D. D. L., Wolfenbittel R. F. Infrared micro-spectrometer based on a diffraction grating // Sensor&Actuators. 2001. V. A 92. P. 88—95.
12. Cooper E. R., Post E. R., Griffith S., Levitan J., Mandis S. D., Quate C. F. Interferometrical accelerometer with high resolution // Applied Physics Letters. 2000. V. 22. N 22. P. 3316—3318.
13. Madou M. J. Fundamentals of Microfabrication: the Science of Miniaturization. CRS Press. 2001.

УДК 512.628.2

Е. В. Новожилов,
Московский Государственный Университет
им. М. В. Ломоносова
Факультет Вычислительной Математики
и Кибернетики

О ПРИВЕДЕНИИ К ПРОСТЕЙШЕМУ ВИДУ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ

Рассматриваются системы линейных дифференциально-алгебраических уравнений с переменными коэффициентами, удовлетворяющими специальным условиям постоянства ранга. Системы данного типа возникают, в частности, при решении таких прикладных задач, как моделирование электронных цепей, химических реакций (определенного типа), а также задачи расчета динамики различных транспортных систем (в том числе на макроуровне). Предлагается метод приведения таких систем к определенной простейшей форме, основанный на построении итерационной процедуры. Предложенный метод применим для систем с любым значением индекса и может быть использован для численного решения дифференциально-алгебраических систем при моделировании процессов в перечисленных прикладных задачах.

Введение

В современных методах расчета моделируемых электронных цепей [1]—[3] наиболее часто используется метод узлового анализа зарядов [4], [5]. Однако такой метод имеет один существенный недостаток: коэффициенты возникающих при этом

дифференциально-алгебраических уравнений обременены недостаточной гладкостью. Индекс¹ таких систем может быть равен 2 и при этом системы могут не иметь нормальной формы Хессенберга (Hessenberg F.) [6]. Метод узлового анализа зарядов электронных цепей приводит к системам вида

$$\begin{aligned} A\dot{q} + f(x) &= r(t); \\ q - g(x) &= 0, \end{aligned}$$

где вектор неизвестной функции (x, q) содержит:

- потенциал u и узлов цепи;
- силу тока I элементов цепи с управляемым напряжением;
- заряд конденсаторов Q ;
- магнитный поток Φ катушек индуктивности.

Предполагаем, что электронная цепь содержит динамические элементы: элементы емкостного сопротивления (конденсаторы) и катушки индуктивности. Для примера рассмотрим модель электронной цепи одного из наиболее распространенных элементов в интегральных схемах — логического элемента "И—НЕ" (NAND-gate).

Пример

Элемент "И—НЕ" состоит из двух обогащенных МОП-транзисторов с каналом n -типа (ME), одного ослабленного (обедненного) МОП-транзистора с каналом n -типа (MD) и заряженного конденсатора (C) (рис. 1). МОП-схемы, как правило, не содержат других элементов кроме МОП-транзисторов,

¹Число последовательных операций дифференцирования для сведения к простейшей форме.

Джонса к оптическим интегральным устройствам [Belea A. J. Optics (Paris), 1992. Vol. 23. N 1. P. 19—26].

Список литературы

1. Валиев К. А., Раков А. В. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике. М.: Радио и связь, 1984.
2. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. 581 с.
3. Ayazi F., Najafi K. High aspect ratio polysilicon micromachining technology // Sensors & Actuators. 2000. V. 87. P. 46—51.
4. McNie M., King D., Vizard C., Holmes A., Lee K. W. High aspect ratio micromachining (HARM) technologies // Microsystem technologies. 2000. V. 6. P. 184—188.
5. Kupka R. K., Bouamrane F., Cremers C., Megtert S. Microfabrication: X-LIGA and application // Appl. Surf. Sci. 2000. V. 164. P. 97—100.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Наука, 1972.
7. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Оптика М.: Наука, 1980.
8. Goodman J. W. Introduction to Fourier Optics / VcGraw-Hill. N.-Y., 1996.
9. Хинчин Спектры и анализ М.: Наука, 19
10. Yee G. V., Maluf N. I., Albin M., Kovacs G. T. A. Miniature spectrometers for biochemical analysis // Sensor&Actuators A. 1997. V. 58. P. 61—66.
11. Kong S. H., Wijngards D. D. L., Wolfenbittel R. F. Infrared micro-spectrometer based on a diffraction grating // Sensor&Actuators. 2001. V. A 92. P. 88—95.
12. Cooper E. R., Post E. R., Griffith S., Levitan J., Mandis S. D., Quate C. F. Interferometrical accelerometer with high resolution // Applied Physics Letters. 2000. V. 22. N 22. P. 3316—3318.
13. Madou M. J. Fundamentals of Microfabrication: the Science of Miniaturization. CRS Press. 2001.

УДК 512.628.2

Е. В. Новожилов,
Московский Государственный Университет
им. М. В. Ломоносова
Факультет Вычислительной Математики
и Кибернетики

О ПРИВЕДЕНИИ К ПРОСТЕЙШЕМУ ВИДУ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ

Рассматриваются системы линейных дифференциально-алгебраических уравнений с переменными коэффициентами, удовлетворяющими специальным условиям постоянства ранга. Системы данного типа возникают, в частности, при решении таких прикладных задач, как моделирование электронных цепей, химических реакций (определенного типа), а также задачи расчета динамики различных транспортных систем (в том числе на макроуровне). Предлагается метод приведения таких систем к определенной простейшей форме, основанный на построении итерационной процедуры. Предложенный метод применим для систем с любым значением индекса и может быть использован для численного решения дифференциально-алгебраических систем при моделировании процессов в перечисленных прикладных задачах.

Введение

В современных методах расчета моделируемых электронных цепей [1]—[3] наиболее часто используется метод узлового анализа зарядов [4], [5]. Однако такой метод имеет один существенный недостаток: коэффициенты возникающих при этом

дифференциально-алгебраических уравнений обременены недостаточной гладкостью. Индекс¹ таких систем может быть равен 2 и при этом системы могут не иметь нормальной формы Хессенберга (Hessenberg F.) [6]. Метод узлового анализа зарядов электронных цепей приводит к системам вида

$$\begin{aligned} A\dot{q} + f(x) &= r(t); \\ q - g(x) &= 0, \end{aligned}$$

где вектор неизвестной функции (x, q) содержит:

- потенциал u и узлов цепи;
- силу тока I элементов цепи с управляемым напряжением;
- заряд конденсаторов Q ;
- магнитный поток Φ катушек индуктивности.

Предполагаем, что электронная цепь содержит динамические элементы: элементы емкостного сопротивления (конденсаторы) и катушки индуктивности. Для примера рассмотрим модель электронной цепи одного из наиболее распространенных элементов в интегральных схемах — логического элемента "И—НЕ" (NAND-gate).

Пример

Элемент "И—НЕ" состоит из двух обогащенных МОП-транзисторов с каналом n -типа (ME), одного ослабленного (обедненного) МОП-транзистора с каналом n -типа (MD) и заряженного конденсатора (C) (рис. 1). МОП-схемы, как правило, не содержат других элементов кроме МОП-транзисторов,

¹Число последовательных операций дифференцирования для сведения к простейшей форме.

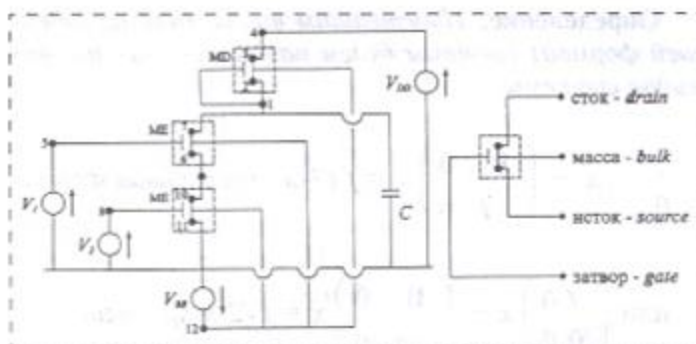


Рис. 1. Элемент "И-НЕ" и схема МОП-транзистора

которые могут также выполнять функцию управляемых резисторов. В нашем примере таковым является обедненный МОП-транзистор (MD), для этой цели в его схеме соединены затвор и исток.

Напряжение на стоке d (drain) транзистора MD равно $V_{DD} = 5$ В. Массы b (bulk) транзисторов не заземлены и $V_{BB} = -2,5$ В. Истоки s (source) обоих транзисторов ME заземлены, напряжение на их затворах g (gate) соответственно равно V_1 и V_2 . Более подробная (точнее отражающая физическую структуру) схема МОП-транзистора дана в работе [5]. При расчете этой модели будет получена система с индексом 2.

Работу транзистора в соответствии с приведенной схемой можно описать так. Ток i_{ds} может протекать от стока к истоку тогда и только тогда, когда управляющее напряжение U_{gs} между затвором и истоком больше, чем пороговое напряжение (значение которого зависит от конкретной применяемой технологии) U_T . Затвор изолирован от канала сток-исток тонким слоем двуоксида кремния (SiO_2); т. е. сопротивление R_{sd} между истоком и стоком почти "бесконечно" большая величина ($\sim 10^{15}$ Ом).

При использовании метода узлового анализа зарядов в результате расчета получаем системы дифференциально-алгебраических уравнений с размерностью коэффициентов 29×29 (эту систему можно получить, если записать закон Кирхгофа для каждого из двенадцати узлов, обозначенных на схеме элемента). Не будем выписывать здесь все уравнения системы (система полностью приведена и рассмотрена в работе [1]), запишем только по одному уравнению (в качестве типового) из трех основных частей системы.

1. Дифференциальная часть системы — 12 уравнений для значений зарядов; одно из уравнений дифференциальной части имеет вид:

$$-\dot{Q}_{lgs} - \dot{Q}_{lbs} + \frac{u_2 - u_1}{R_s} + \frac{u_2 - u_3}{R_{sd}} + i_{ds}^D(u_3 - u_2, u_1 - u_2, u_{12} - u_2) = 0.$$

2. Четыре характеристических уравнения для напряжений истоков типа

$$u_{12} - V_{BB} = 0.$$

3. Для емкостей — 13 характеристических уравнений типа

$$Q_{lgs} - q_{gs}(u_1 - u_2) = 0.$$

В результате моделирования с использованием, например, метода обратного дифференцирования (BDF) исходной системы можно получить следующую зависимость выходного сигнала в узле u_1 от значений напряжения на входах V_1 , V_2 (рис. 2). Значение u_1 мало (FALSE) тогда и только тогда, когда V_1 и V_2 имеют наибольшее значение (TRUE). На рисунке изображены численные результаты моделирования. Например, можно видеть, что отрезки времени [10 нс, 15 нс] и [50 нс, 55 нс] являются критическими при оценке уровня напряжения. И поэтому при установке порогового напряжения необходимо учитывать разницу двумя минимальными значениями: 1) локального минимума в точках (12,5 + 40н) нс; 2) почти постоянного минимального значения на отрезках [(25 + 40н) нс, (30 + 40н) нс].

Задача по упрощению систем дифференциально-алгебраических уравнений для расчета даже такого простого элемента электронной цепи имеет важное значение, поскольку позволяет уменьшить дифференциальную часть без изменения степени гладкости коэффициентов. В качестве объекта упрощения выберем общий вид линейной системы.

Рассматриваемые системы

Рассматриваются системы линейных дифференциально-алгебраических уравнений. Напомним, что дифференциально-алгебраической системой называется система уравнений вида [11]

$$A(t)\dot{x} + B(t)x = f, \quad (1)$$

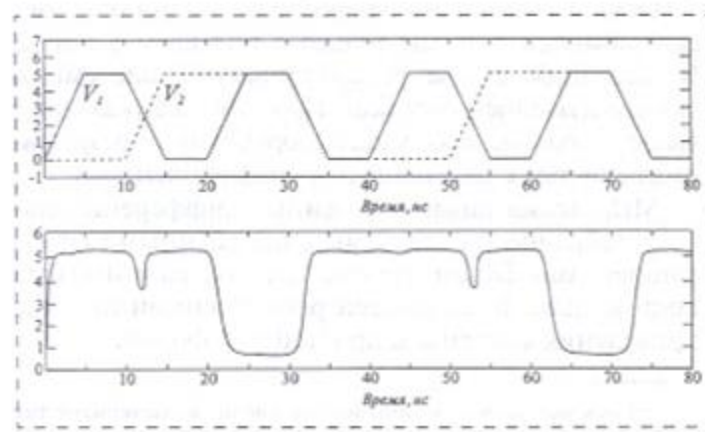


Рис. 2. Выходной сигнал в узле 1

$A(t)$, $B(t)$ — коэффициенты, зависящие от переменной $t \in S \subset \mathbb{R}_1$.

Старший коэффициент $A(t)$ системы (1) является, вообще говоря, вырожденным, т. е. соответствующая матрица вырождена. Поэтому система (1) может содержать и чисто алгебраические уравнения.

Основной задачей, которой посвящена данная статья, является задача о приведении системы дифференциально-алгебраических уравнений к простейшему виду, т. е. к виду, при котором система содержит минимальное число дифференциальных уравнений.

Простейшим случаем систем указанного типа является случай систем с постоянными коэффициентами. Наиболее известные [12] из уже существующих методов исследования систем с постоянными коэффициентами — это методы, связанные с приведением системы к *нормальной форме Кронекера*, а также метод, в котором используется так называемый проектор Дрэзина и спектральные проекторы. В ином подходе [13] для упрощения системы используется разбиение с помощью специальной последовательности проекторов, называемой *цепным проектором*. В работе [14] для упрощения систем был предложен специальный метод выбора последовательности проекторов (*канонические проекторы*). В работе [15] этот метод был усовершенствован. А именно, оказалось, что при выполнении определенных условий, накладываемых на коэффициенты, исходная система может быть сведена к нормальной форме Кронекера с *нильпотентной цепной матрицей Жордана* в качестве коэффициента при производной в одной из двух получающихся подсистем.

Приведение к нормальной форме Кронекера позволяет разделить исходную систему на две подсистемы: дифференциальную, разрешенную относительно производной неизвестной функции, и дифференциальную, разрешенную относительно самой функции. Но при этом общее число дифференциальных уравнений не уменьшается.

Отметим также, что в перечисленных работах рассматриваются системы только с индексом 1 или 2. В настоящей статье рассматриваются системы с любым значением индекса². При этом все указанные выше методы не дают удовлетворительного результата для систем с переменными коэффициентами.

Мы рассматриваем линейные дифференциально-алгебраические системы с переменными коэффициентами. Будем требовать, чтобы ранг $A(t)$ был постоянным. В настоящей работе описан процесс приведения системы к простейшей форме.

²Здесь под *индексом* понимается число, характеризующее количество формальных операций дифференцирования, необходимых для редукции системы к некоторому простому виду.

Определение. Простейшим видом (или простейшей формой) системы будем называть один из двух видов системы:

$$\begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} x' + \begin{pmatrix} B_{11} & 0 \\ I & 0 \end{pmatrix} x = f \text{ (1-я простейшая форма)}$$

$$\text{или } \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} x' + \begin{pmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} x = f \text{ (2-я простейшая форма),}$$

где B_{11} — некоторая матрица, зависящая, вообще говоря, от переменной t .

Здесь и далее в этой работе под словами *упрощение системы* будем понимать приведение системы к простейшему виду, указанному в данном определении, а под словами *упрощение матрицы* —

приведение матрицы к виду $\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$.

Ниже мы перечислим преобразования, которые используются для упрощения системы, после чего опишем общую итерационную схему и затем построим итерационную процедуру по указанной схеме, подробно описав каждый шаг.

Используемые преобразования

Будем рассматривать класс линейных систем с *постоянным рангом*. А именно, рассматриваем системы вида

$$A(t)x'(t) + B(t)x(t) = f(t),$$

где $x \in E_1$, $f(t) \in E_2$; $t \in S \subset \mathbb{R}_1$, E_1 , E_2 — некоторые линейные пространства,

$$A(t), B(t): E_1 \rightarrow E_2,$$

зависящие от t гомоморфизмы линейных пространств, для которых выполнено условие³ $\text{rank } A(t) = \text{const}$.

Сведение системы к простейшему виду осуществляется двумя типами преобразований. Первый тип — умножение системы слева на невырожденную матрицу D . Это преобразование можно рассматривать, как преобразование в пространстве E_2 . При этом система

$$A(t)x'(t) + B(t)x(t) = f(t)$$

переходит в систему

$$DA(t)x'(t) + DB(t)x(t) = Df(t).$$

³В дальнейшем (при описании итерационной процедуры) мы наложим также дополнительные условия постоянства ранга.

Второй тип — преобразование в пространстве E_1 . При этом система

$$A(t)x'(t) + B(t)x(t) = f(t)$$

переходит в систему

$$A(t)[Px(t)]' + B(t)[Px(t)] = f(t).$$

Здесь $D(t)$ и $P(t)$ автоморфизмы пространств E_1 и E_2 . Попробуем теперь с помощью конечного числа таких преобразований выделить дифференциальную часть в нашей системе (1). Преобразование системы с помощью $D(t)$ и $P(t)$ можно описать в виде следующей диаграммы

$$\begin{array}{ccc} E_1 & \xrightarrow{A \frac{d}{dt} + B} & E_2 \\ P(t) \downarrow & & \downarrow D(t) \\ E_1 & \xrightarrow{\tilde{A} \frac{d}{dt} + \tilde{B}} & E_2 \end{array}$$

Упрощение системы

Опишем последовательность шагов по приведению системы к простейшей форме.

1. Сначала упрощаем матрицу $A(t)$ (приводим к виду $\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$). Это делается достаточно просто (см. ниже).

2. Далее преобразуем коэффициент $B(t)$ для приведения его к виду, указанному в определении простейшего вида системы. При этом, вообще говоря, мы уменьшаем размерность системы (исключая получившиеся алгебраические уравнения, разрешенные относительно компонент вектора решения и условия согласования на значения правых частей исходной системы).

Преобразование матрицы $B(t)$ является более сложной процедурой и будет проводиться по некоторой итерационной схеме.

Итак, сначала упрощаем коэффициент A . Именно с помощью преобразований $D(t)$ и $P(t)$ сводим этот коэффициент к виду:

$$A = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Это можно сделать благодаря тому, что (по условию) матрица A имеет постоянный ранг. Применение преобразований $D(t)$, $P(t)$ к исходной системе, приводит ее к виду

$$DAPx'(t) + [DAP' + DBP]x(t) = \tilde{f}(t), \quad (3)$$

где $DAP = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$. Здесь для простоты аргумент t у

матриц D , P , A , B опущен и через $\tilde{f}$ обозначено новое (преобразованное) значение правой части.

Далее нам необходимо привести коэффициент B к достаточно простому виду. И поскольку теперь в ходе дальнейших преобразований нужно сохранять канонический вид (2) коэффициента A , то преобразования D , P должны иметь специальную форму, а именно:

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ 0 & D_{22} \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} P_{11} & 0 \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

причем $D_{11}P_{11} = 1$, а матрицы D_{22} и P_{22} — произвольные и обратимые.

Такая структура и размерность матриц D и P соответствуют разбиению пространства E_1 на подпространства E_{11} , E_{12} и пространства E_2 на подпространства E_{21} , E_{22} :

$$E_1 = E_{11} \oplus E_{12}, \quad E_2 = E_{21} \oplus E_{22},$$

где

$$E_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ x_2 \end{bmatrix} = \ker A, \quad E_{11} = \begin{bmatrix} x_1 \\ 0 \end{bmatrix} = E_1 / \ker A,$$

$$E_{21} = \begin{bmatrix} f_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \operatorname{im} A, \quad E_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_2 \end{bmatrix} = E_2 / \operatorname{im} A.$$

При этом получается, что

$$\dim E_{11} = \dim E_{21} = \operatorname{rank} A.$$

Система (3) после преобразований (4) приобретает вид:

$$\begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} x'(t) + \begin{pmatrix} \tilde{B}_{11} & \tilde{B}_{12} \\ \tilde{B}_{21} & \tilde{B}_{22} \end{pmatrix} x(t) = \tilde{f}(t), \quad (5)$$

где

$$\tilde{f}(t) = Df(t);$$

$$\begin{aligned} \tilde{B}_{11} = & D_{11}P'_{11} + D_{11}B_{11}P_{11} + D_{12}B_{21}P_{11} + \\ & + D_{11}B_{12}P_{21} + D_{12}B_{22}P_{21}; \end{aligned}$$

$$\tilde{B}_{12} = (D_{11}B_{12} + D_{12}B_{22})P_{22}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tilde{B}_{21} = & D_{22}B_{21}P_{11} + D_{22}B_{22}P_{21} = \\ = & D_{22}(B_{21}P_{11} + B_{22}P_{21}); \end{aligned}$$

$$\tilde{B}_{22} = D_{22}B_{22}P_{22}.$$

Для упрощения записи вернемся снова к обозначению B вместо $\tilde{B}$ и к f вместо $\tilde{f}$, имея в виду уже преобразованные значения.

Теперь применяем *итерационную процедуру* по упрощению матрицы B .

1-й итерационный шаг

Сначала приводим элемент B_{22} коэффициента B к виду:

$$\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Это можно сделать аналогично тому, как мы упрощали матрицу A , естественно при условии

$$\text{rank } B_{22} = \text{const}. \quad (8)$$

Сформулируем это условие в терминах исходных коэффициентов A и B . Заметим, что B_{22} действует в пространствах E_{12} , E_{22} , или, в других обозначениях

$$\ker A \xrightarrow{B|_{\ker A}} E_2/\text{im } A,$$

($B_{22} = B|_{\ker A}$). Тогда условие (8) можно записать следующим образом:

$$\text{rank}(B|_{\ker A}) = \text{const}.$$

После приведения матрицы B_{22} к виду (7) и нескольких дополнительных элементарных преобразований получаем систему (с естественными обозначениями)

$$\left. \begin{aligned} x_1' + B_{11}x_1 + B_{12}^2x_3 &= f_1(t); \\ x_2 &= f_2(t); \\ B_{21}^2x_1 &= f_3(t). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

При этом для переменной x_2 получаем точное выражение

$$x_2 = f_2(t).$$

Рассмотрим теперь два оставшихся уравнения:

$$\left\{ \begin{aligned} x_1' + \tilde{B}_{11}x_1 &= f_1(t) - B_{12}^2x_3; \\ B_{21}^2x_1 &= f_3(t) \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Независимо от значения коэффициента B_{12}^2 компонента x_3 вектора решения выбирается произвольно, а x_1 есть решение дифференциального уравнения, которое должно удовлетворять условию $B_{21}^2x_1 = f_3(t)$. Поэтому решение такой задачи возможно не при любых значениях f_i в правой части. И на следующих этапах преобразований будут появляться дополнительные условия согласования.

Следующим этапом итерационного шага является приведение⁴ блока B_{21}^2 к виду

$$\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

И здесь очевидно необходимо наложить следующее условие постоянства ранга:

$$\text{rank } B_{21}^2 = \text{const}.$$

Заметим, что B_{21}^2 — это матрица отображения $B|_{[E_1/\ker A]}$, действие которого можно описать с помощью следующей диаграммы:

$$E_1/\ker A \xrightarrow{B|_{[E_1/\ker A]}} [E_2/\text{im } A]/\text{im } B_{22}.$$

Оператор $B_{22} = B|_{\ker A}$ был уже определен ранее.

Для упрощения B_{21}^2 мы используем преобразования, которые не только сохраняют нормальную форму A , но и текущую форму B . Нетрудно видеть, что эти преобразования D и P должны иметь такую форму:

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & D_{13} \\ 0 & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} P_{11} & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} & 0 \\ P_{31} & 0 & P_{33} \end{bmatrix},$$

и удовлетворять условиям

$$D_{11}P_{11} = I, \quad D_{22}P_{22} = I$$

(матрицы D_{33} и P_{11} обратимы). Посмотрим к какому виду мы сведем систему. Представим элементы x_1, f_1, f_3 каждый в виде двух векторов:

$$x_1 = [x_{1a}, x_{1b}], \quad f_1 = [f_{1a}, f_{1b}], \quad f_3 = [f_{3c}, f_{3d}].$$

⁴Если на некотором шаге итерации блок $B_{21}^2 = 0$, то это означает конец итерационного процесса.

Тогда полученная система запишется в виде:

$$\begin{cases} x'_{1a} + B_{11}^{aa}x_{1a} + B_{11}^{ab}x_{1b} + B_{12}^ax_3 = f_{1a}, \\ x'_{1b} + B_{11}^{ba}x_{1a} + B_{11}^{bb}x_{1b} + B_{12}^bx_3 = f_{1b}, \\ x_2 = f_2, \\ x_{1a} = f_{3c}, \\ 0 = f_{3d}. \end{cases} \quad (12)$$

Теперь подставим значение x_{1a} в первое уравнение и в результате получим:

1) новую дифференциально-алгебраическую систему относительно переменной x_{1b}

$$\begin{cases} x'_{1b} + B_{11}^{bb}x_{1b} = f_{1b}^*, \\ B_{11}^{ab}x_{1b} = f_{1a}^*; \end{cases}$$

2) условие согласования для правой части

$$f_{3d} = 0;$$

3) несколько алгебраических уравнений, из которых однозначно определяются некоторые компоненты решения:

$$\begin{cases} x_2 = f_2; \\ x_{1a} = f_{3c}. \end{cases}$$

Введя обозначения

$$y = \begin{bmatrix} x_{1b} \\ x_{1a} \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad g = \begin{bmatrix} f_{1b} - B_{11}^{ba}f_{3c} - B_{12}^bx_3 \\ f_{1a} - f_{3c}' - B_{11}^{aa}x_{1a} - B_{12}^ax_3 \end{bmatrix},$$

получим новую систему

$$\begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} y' + \begin{pmatrix} B_{11}^{bb} & 0 \\ B_{11}^{ab} & 0 \end{pmatrix} y = g. \quad (13)$$

Таким образом, после первого шага итерации мы пришли к системе, в которой главный коэффициент A имеет требуемую каноническую форму

$$\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \text{и при этом уменьшили количество диффе-}$$

ренциальных уравнений в системе. На этом заканчивается 1-й итерационный шаг.

2-й итерационный шаг

Будем упрощать коэффициент $\begin{bmatrix} B_{11}^{bb} & 0 \\ B_{11}^{ab} & 0 \end{bmatrix}$ по уже рассмотренной итерационной процедуре, в которой каждый следующий шаг итерации начинается

с упрощения блока⁵ B_{22} , приводя его к виду $\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$,

или, если $B_{22} = 0$, как в данном случае, с упрощения блока B_{21}^2 . Например, в системе (13) этому блоку отвечает блок B_{11}^{ab} , который и будем приводить к простому виду. При этом, естественно, надо потребовать, чтобы

$$\text{rank } B_{11}^{ab} = \text{const}. \quad (14)$$

Заметим, что B_{11}^{ab} — это матрица отображения, действие которого можно представить с помощью следующей диаграммы:

$$[E_1/\ker A]/\ker B_{21}^2 \xrightarrow{B_{11}^{ab}} \text{im } A \cap \text{im } B_{21}^2.$$

Сделаем важное замечание. В процессе приведения системы к простейшей форме мы последовательно разбиваем исходную матрицу коэффициента B системы (1) на подматрицы:

- сначала (после упрощения матрицы A) в (5) на подматрицы B_{11} , B_{12} , B_{21} , B_{22} ;
- затем (после приведения B_{22} к виду (7)) в свою очередь разбиваются B_{12} (на нулевую подматрицу и подматрицу B_{12}^2) и B_{21} (на нулевую подматрицу и подматрицу B_{21}^2).

И с этого момента до последнего шага итерации мы последовательно разбиваем на подматрицы блок B_{11} системы (5). Сначала, например, после приведения B_{21}^2 к виду (11) B_{11} разбивается на подматрицы B_{11}^{aa} , B_{11}^{ab} , B_{11}^{ba} , B_{11}^{bb} так, что $\dim B_{11}^{aa} = \text{rank } B_{21}^2$, и так далее. Запишем эту последова-

⁵Мы используем введенные выше обозначения для элементов матрицы коэффициента при алгебраической части системы.

тельность разбиения в виде схемы (используя другие индексы для подматриц):

$$B_{11} \rightarrow \left[\begin{array}{c|cc} B_{01} & & B_{02} \\ \hline & B_{11} & B_{12} \\ B_{03} & B_{13} & \begin{array}{cc} B_{21} & B_{22} \\ B_{23} & \end{array} \end{array} \right], \quad (15)$$

где в принятых обозначениях, например, B_{02} соответствует B_{11}^{ab} в системе (12). Разбиение при этом осуществляется так, что

$$\dim B_{(i)1} = \text{rank } B_{(i-1)2}.$$

Например, $\dim B_{11} = \text{rank } B_{02}$. Очевидно, что итерация заканчивается тогда, когда

$$\dim B_{m1} = \text{rank } B_{m2}$$

и $(m+2)$ -й шаг будет последним шагом итерации.

В диаграмме (15) выделением отмечены те блоки, постоянства рангов которых мы будем требовать на соответствующих шагах итерации. Если усилить эти условия и потребовать, чтобы

$$\text{rank } B_{11} = \text{const}, \quad (16)$$

то для сведения системы (1) к простейшему виду условие (16) будет достаточным, но не будет необходимым.

Завершение итерации

Итерационная процедура заканчивается на m -м шаге, где m такое, что $B_{(m-2)2} = I$ или $B_{(m-2)2} = 0$. При этом все оставшиеся дифференциальные и алгебраические уравнения в исходной системе будут сведены либо к условиям согласования на значения правых частей

$$f_i = 0,$$

либо к алгебраическим уравнениям вида

$$x_j = f_k.$$

Систему на этом последнем шаге итерационного процесса будем называть *финальной системой*.

Таким образом, мы доказали следующую теорему.

Теорема. Произвольная линейная дифференциально-алгебраическая система типа (1) может быть сведена к простейшему виду, если коэффициенты A и B этой системы удовлетворяют следующим условиям:

1) $\text{rank } A = \text{const}$;

$$2) \text{rank } (B|_{\ker A}) = \text{const};$$

$$3) \text{rank } (B|_{[E_1/\ker A]}) = \text{const};$$

$$4) \text{rank } B_{11} = \text{const}.$$

Следствие. Из условий, сформулированных в теореме, можно сделать следующие выводы:

1) условия 1, 2 и 3 являются необходимыми и достаточными для сведения системы, к виду (13);

2) чтобы сформулировать необходимые и достаточные условия, надо ослабить условие 4, а именно, потребовать выполнения условий $\text{rank } B_{i2} = \text{const}$, где $i = 0, 1, \dots, m$; $m: \text{rank } B_{(m-1)2} = \text{rank } B_{((m)2)}$.

Пример. Рассмотрим пример конкретной системы и покажем, к какому результату можно прийти в ходе упрощения по построенной выше итерационной схеме. Пусть исходная система имеет вид:

$$\left. \begin{array}{lcl} y_1' + \varphi_{11}(t)y_1 + \varphi_{13}(t)y_3 & = & f_1(t); \\ & y_2 & = f_2(t); \\ \varphi_{31}(t)y_1 & = & f_3(t). \end{array} \right\} \quad (17)$$

Все компоненты x_1, x_2, x_3 — скаляры. Как видно из системы (17), коэффициент A уже имеет каноническую форму, коэффициент B тоже имеет простой вид в соответствии с итерационной схемой. Поэтому в ходе упрощения и решения такой системы нам не потребуется проделывать все этапы (кроме последнего) на 1-м шаге итерации. Результат упрощения будет следующим:

а) если $\varphi_{31} = 0$, то имеем финальную систему вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1' + \varphi_{11}y_1 = f_1 - \varphi_{13}y_3; \\ f_3 = 0; \\ y_2 = f_2, \end{array} \right.$$

где $f_3 = 0$ — условие согласования; y_3 — выбирается произвольно; $y_1 = y_1(t, C)$ — решение дифференциального уравнения;

б) если $\varphi_{31} \neq 0$, то при $\varphi_{13} = 0$ получим систему, в которой будет только два алгебраических уравнения и одно условие согласования, а дифференциальная часть будет полностью отсутствовать:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = \tilde{f}_3, \\ y_2 = f_2, \\ f_1 - \tilde{f}_3' - \varphi_{11}\tilde{f}_3 = 0. \end{array} \right.$$

Наконец, при $\varphi_{13} \neq 0$ все компоненты решения определяются однозначно:

$$\begin{cases} y_3 = \frac{f_1}{\varphi_{13}} - \frac{\tilde{f}_3}{\varphi_{13}} - \frac{\varphi_{11}\tilde{f}_3}{\varphi_{13}}, \\ y_1 = \tilde{f}_3, \\ y_2 = f_2. \end{cases}$$

Заключение

Наиболее часто решение дифференциально-алгебраических систем (с переменными или постоянными коэффициентами) большой размерности необходимо при расчете, анализе и реконструировании фрагментов моделируемых электронных цепей (а также систем электронных цепей в целом). Метод, предложенный в настоящей работе, формализует процесс упрощения дифференциально-алгебраических систем. В этом методе используются не только линейные подстановки компонентов решения, которые обычно составляют основную часть циклов методов численного решения таких систем (например, методы Рунге — Кутты), но и дифференциальные подстановки. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить количество дифференциальных уравнений в системе. Предложенный метод может быть использован в качестве алгоритма для численного решения задачи по упрощению.

В настоящей работе рассматривались системы дифференциально-алгебраических уравнений следующего типа:

$$A(t)\dot{x} + B(t)x = f,$$

с накладываемыми на коэффициенты $A(t)$ и $B(t)$ системы условиями $\text{rank } A = \text{const}$, $\text{rank } (B|_{\ker A}) = \text{const}$, $\text{rank } B|_{[E_1/\ker A]} = \text{const}$, $\text{rank } B_{11}^{ab} = \text{const}$.

Был предложен способ упрощения системы — получения простейшей формы, т. е. такого вида системы, при котором она, во-первых, имеет наименьшее количество дифференциальных уравнений, и во-вторых, матрица B имеет вид

$$\begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ I & 0 \end{bmatrix} \quad \text{или} \quad \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

В данном методе использована специальная итерационная процедура преобразования матрицы B . Итерация заканчивается тогда, когда мы приходим к финальной системе. Еще раз отметим тот факт, что предложенная схема применима для дифференциально-алгебраических систем с любым значением индекса.

Автор статьи выражает большую признательность и благодарность профессору Виктору Евгеньевичу Шаталову за ценные советы и оказанную помощь в работе над статьей.

Список литературы

1. Tischendorf C., März R. Recent results in solving differential-algebraic equations in circuit simulation // SIAM Journal. Scientific Computation. 1997. 18 (1): 139–159.
2. Марьяшкин Н. Я., Овчинников Е. Э., Белаш В. О., Глебов А. Л. Решение дифференциально-алгебраических систем схемотехнического анализа БИС. М.: ВЦ АН СССР, 1991.
3. Непрерыв В. Расчет электрических цепей на персональной ЭВМ. М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Tischendorf C. Solution of Index-2 Differential Algebraic Equations and its Application in Circuit Simulation. Дис., 1994.
5. Günther M., Feldman U. CAD-modelling of electric circuits. A classification with respect to structure and index. 1995. (рукопись).
6. Griepentrog E. Index reduction methods for differential-algebraic equations // Inst. für Mathem. Berlin: Humboldt- Univ. 1992. 92-1, P. 14–29.
7. Gear G. W. Differential-algebraic equations index transformations // SIAM J. Sci. Stat. Comput. 1993. 9: 39–47.
8. Gear G. W. The simultaneous numerical solution of differential-algebraic equations // IEEE Trans. Circuit Theory. CT-18. 1971. P. 89–95.
9. Gear G. W., Petzold L. R. ODE methods for the solution of differential-algebraic systems // SIAM J. Num. Anal. 1984. 21 (4). P. 716–728.
10. Brenan K. E., Campbell S. L., Petzold L. R. Numerical solution of initial value problems in differential-algebraic equations. Elvise Science Publishing Co. Inc., 1989.
11. März R., Griepentrog E. Differential-algebraic equations and their numerical treatment // Teubner Texte zur Mathematik. 1986. 88. Leipzig. Teubner.
12. Lewis F. L. A survey of linear singular systems // Circuits Systems Signal Process. 1986. 5 (1): 3–36.
13. März R., Griepentrog E. Basic properties of some differential-algebraic equations // Zeitschrift für Analysis und ihre Anwendungen. 1989. 8 (1): 25–40.
14. März R. On quasilinear index-2 differential-algebraic equations // Fachbereich Mathematik, 1992.
15. März R. Canonical projectors for linear differential-algebraic equations // Computers Math. Applic. 1996. 31 (4).
16. Шубин Е. А., Егоров А. Е. Линейные дифференциальные уравнения в частных производных // Современные проблемы математики: фундаментальные исследования. Т. 30. М.: ВИНТИ, 1987.
17. Шабат Б. В., Лаврентьев М. А. Методы теории функции комплексного переменного. М.: Наука, Изд. 4, 1973.
18. Михлин С. Г. Линейные уравнения в частных производных. М.: Наука, 1977.
19. Hansen B. Linear differential-algebraic equations // Fachbereich Mathematik. Humboldt- Univ., 1992. 92-1. P. 30–38.
20. März R. Extra-ordinary differential-algebraic equations. Attempts to analysis of differential-algebraic systems // Fachbereich Mathematik. 1997. (93-13).
21. Winkle R., Lamour R., März R. How floquet theory applies to differential-algebraic equations // Journal of mathematical analysis and applications. 1996. 217: 372–394.
22. März R. Criteria for the trivial solution of differential-algebraic equations with small nonlinearities to be asymptotically stable // Fachbereich Mathematik. 1997. (97-13).
23. März R., Balla K. Transfer of boundary value conditions for daes of index-1 // SIAM Journal. Numerical Analysis. 1996. 33 (6): 2318–2322.
24. Shatalov V. Ye., Sternin B. Yu. Borel-Laplace Transform and Asymptotic Theory (Introduction to Ressurgent Analysis) // CRC-Press, 1995.
25. Левинсон Н., Коддингтон Э. А. Теория обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Изд-во иностранной литературы, 1958.

В. Г. Днепровский, канд. техн. наук,
Г. Я. Карапетян, Г. А. Пустовалов,
М. В. Лысенко,
 НИИ механики и прикладной математики
 Ростовского государственного университета,
 г. Ростов-на-Дону
 e-mail: dnepr@math.rsu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ термоЭДС ОТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ КРИСТАЛЛЕ

Рассмотрены процессы зарядки и разрядки конденсатора, одна обкладка которого сделана из металла, а другая — из полупроводника, на который с внешней стороны нанесен металлический электрод. Показано, что при зарядке конденсатора в магнитном поле и разрядке, когда магнитное поле отсутствует, дополнительная потенциальная энергия конденсатора может выделяться не только на контакте металл—полупроводник, но и на резисторе, через который разряжается или заряжается конденсатор.

С появлением микроминиатюрных устройств, разрабатываемых в рамках микро- и наносистемной техники возрастает актуальность разработки микроминиатюрных источников питания длительного пользования и охлаждающих устройств для улучшения шумовых характеристик. Одной из возможных реализаций этой проблемы является использование термоэлектрических преобразователей с повышенным КПД. В настоящей работе приводятся результаты исследований, подтверждающие возможность реализации новой конструкции термоэлектрического преобразователя с высоким значением КПД.

Рассмотрим заряд термоэлектрического конденсатора, который и представляет систему металл—полупроводник—диэлектрик—металл, от постоянного источника напряжения через резистор R .

Уравнение, описывающее этот процесс, имеет вид:

$$RC \frac{du}{dt} + u_{C_1} + u_{C_2} + u_{C_3} = U_k + U_0, \quad (1)$$

где $C = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_2 C_3}$, C_2, C_3 — емкость между металлом и полупроводником, образованная за счет того, что электрическое поле проникает в полупроводник; C_1 — емкость межэлектродного пространства, где находится диэлектрик, $u_{C_1} = \varphi'_1 - \varphi'_0$,

$u_{C_2} = \varphi'_0 - \varphi_0$, $u_{C_3} = \varphi_1 - \varphi'_1$ изменение потенциала на C_i . Если используется достаточно низкоомный проводник (с проводимостью более $0,1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$), то глубина проникновения электрического поля в глубь полупроводника не превышает сотых долей микрометра, а толщина диэлектрической пленки выбирается в пределах нескольких микрометров, поэтому $C_1 \ll C_2$ и $C_1 \ll C_3$. По этой же причине $u_{C_1} \gg u_{C_2}$, $u_{C_1} \gg u_{C_3}$. Тогда, обозначая $u_{C_1} \approx u$

$$\text{и } C = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_2 C_3} \approx C, \text{ можно записать}$$

для напряжения на конденсаторе:

$$RC \frac{du}{dt} + u = U_k + U_0. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) имеет вид:

$$u(t) = A e^{-t/RC} + U_k + U_0. \quad (3)$$

В начальный момент времени конденсатор не заряжен, поэтому $u_{0C_1} = 0$, $u_{0C_3} + u_{0C_2} = U_k$, поэтому $u(0) = U_k$, поскольку $u = u_{C_1} + u_{C_2} + u_{C_3}$. Тогда

$$A + U_k + U_0 = U_k, \quad A = -U_0 \quad \text{и}$$

$$u(t) = U_0(1 - e^{-t/RC}) + U_k. \quad (4)$$

Ток через конденсатор $i = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$, а энергия заряженного конденсатора

$$\begin{aligned} W_C &= \int_0^\infty u di = \int_0^\infty U_0(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} dt + \\ &+ \int_0^\infty \frac{U_k U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} dt = \frac{C U_0^2}{2} + C U_k U_0 = \\ &= \frac{U_0^2 + 2 U_0 U_k}{2} C, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\frac{C U_0^2}{2}$ — энергия, полученная конденсатором от источника напряжения; $C U_0 U_k$ — энергия, поглощенная из окружающей среды, так как направление тока заряда выбрано таким образом, что в контакте металл—полупроводник электроны переходят из металла в полупроводник. При таком направлении тока, когда электроны переходят из

металла в полупроводник, им приходится преодолевать потенциальный барьер, равный разности энергий между уровнем Ферми и дном зоны проводимости. Это могут сделать только "быстрые электроны", поэтому в контакте с избытком остаются "холодные" электроны и он охлаждается. Когда ток идет в противоположном направлении, электроны переходят из полупроводника в металл. Так как энергия электронов в полупроводнике больше, чем в металле, то они при переходе отдают часть своей энергии кристаллической решетке, и переход нагревается. Это явление называется эффектом Пельтье, а коэффициент Пельтье Π равен контактной разности потенциалов [5] ($\Pi = U_k$).

Энергия, выделившаяся на резисторе,

$$W_R = \int_0^{\infty} i^2 R dt = \frac{CU_0^2}{2}. \quad (6)$$

В [1–5] показано, что внешние поля (магнитное, электромагнитное излучение, поле механических деформаций) могут изменять термоЭДС. Поэтому $U_{kA} = U_k + \Delta U_k(A)$, где A — основной параметр внешнего поля (для магнитного поля — это индукции магнитного поля B , для электромагнитного излучения — интенсивность излучения на частоте максимального поглощения I , для деформаций — относительная деформация S). Например, магнитное поле изменяет соотношение быстрых и медленных электронов в токе, за счет того, что быстрые электроны рассеиваются на тепловых колебаниях кристаллической решетки меньше, чем медленные электроны, т. е. в зависимости от значения магнитного поля число быстрых электронов в токе растет, что приводит к увеличению коэффициента Пельтье $\Pi = \alpha T = U_k$, а следовательно, и термоЭДС $\alpha = \alpha_0 [1 + c_\alpha (\eta_H B)^2]$, где α_0 — термоЭДС в отсутствии магнитного поля; c_α — коэффициент, зависящий от характера рассеяния электронов (при рассеянии на тепловых фононах $c_\alpha \approx 0,154$), η_H — холловская подвижность электронов в полупроводнике. Так как время рассеяния электронов на тепловых фононах — порядка 10^{-11} с [4], то при каждом изменении магнитного поля новое равновесное распределение электронов установится также за это время. Это означает, что изменение α и U_k будет происходить с запаздыванием 10^{-11} с, поэтому им можно пренебречь, если постоянная времени при зарядке конденсатора $RC \gg 10^{-11}$ с.

Если термоэлектрический конденсатор при зарядке поместить во внешнее поле, то в этом случае

$$W_C = \frac{U_0^2 + 2U_{kA}U_0}{2} C. \quad (7)$$

При выносе заряженного конденсатора из внешнего поля ($A = 0$) его энергия не изменится, так как внешние поля неэлектрического происхождения не могут изменить заряд на конденсаторе, когда он разомкнут, а предполагается, что емкость не изменяется под действием внешних полей. Например, магнитное поле не может совершить работу по зарядке конденсатора потому, что изменяющееся во времени магнитное поле (при его выключении) порождает вихревое электрическое поле, которое, в свою очередь, порождает вихревые токи только в электродах конденсатора, не изменяя их заряда.

Следовательно, при отсутствии внешнего поля ($B = 0$) энергия конденсатора

$$W_{CA=0} = W_{CA \neq 0}, \text{ т. е.}$$

$$C \frac{U^2 + 2U_k U}{2} = C \frac{U_0^2 + 2U_0 U_{kA}}{2}, \quad (8)$$

где U — напряжение на металлических электродах термоэлектрического конденсатора;

$$U = -U_k + \sqrt{U_k^2 + U_0^2 + 2U_0 U_{kA}}. \quad (9)$$

Нетрудно заметить, что при $U_0 = 0$, $U = 0$, а при $U_0 \gg U_{kA}$, $U_k U \approx U_0 + \Delta U$, $\Delta U = U_{kA} - U_k$.

При разрядке конденсатора на резистор R при отсутствии магнитного поля уравнение, описывающее этот процесс, имеет вид:

$$RC \frac{du}{dt} + u = U_k. \quad (10)$$

Решение этого уравнения $u(t) = A e^{-\frac{t}{RC}} + U_k$, а начальный момент $u(0) = A + U_k = U_k + U$, т. е. $A = U$,

$$u(t) = U e^{-\frac{t}{RC}} + U_k \quad \text{и} \quad i(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (11)$$

Энергия, которая выделится на резисторе,

$$W_R = \int_0^{\infty} i^2 R dt = CU^2/2. \quad (12)$$

Энергия, выделившаяся на контакте металл—полупроводник,

$$W_k = U_k \int_0^{\infty} i dt = CU_k U. \quad (13)$$

Таким образом, в контакте поглощается энергия $CU_k AU_0$, а выделяется $CU_k U$. Тогда

$$\Delta W_k = C(U_0 U_{km} - U U_k) = C[U_0 U_{km} - U_k(-U_k + \sqrt{U_k^2 + U_0^2 + 2U_0 U_{km}})]. \quad (14)$$

При $U_0 \gg U_{km}$, $U_k \approx U_0 + \Delta U$ и $\Delta W = CU_0 \Delta U$.

Следовательно, в контакте энергии поглотится больше, чем выделится, на величину $\Delta W = CU_0 \Delta U$. Согласно закону сохранения энергии эта энергия должна выделиться на резисторе R :

$$W_R = \frac{CU^2}{2} = C \frac{(-U_k + \sqrt{U_0^2 + U_k^2 + 2U_0 U_{km}})^2}{2} \approx C \frac{U_0^2 + 2U_0 \Delta U}{2}. \quad (15)$$

Так как $CU_0^2/2$ — энергия, которую получает конденсатор от источника напряжения, а W_R — энергия, которую отдает конденсатор при разрядке, то получается, что при разрядке на резисторе выделится энергии больше на величину $CU_0 \Delta U$. Это происходит потому, что в контакте при зарядке конденсатора поглощается тепловая энергия из окружающей среды (контакт охлаждается). Эта поглощенная в контакте кинетическая энергия (так как при переходе через контакт кинетическая энергия электронов увеличивается за счет поглощения тепловой энергии кристаллической решетки, что приводит к охлаждению в области контакта, а следовательно, и к поглощению тепла из окружающей среды) превращается в потенциальную энергию заряженного конденсатора, что фиксируется членом $W = CU_0 U_{km}$ в выражении (5).

При разряде конденсатора потенциальная энергия опять превращается в контакте в тепловую (кинетическую), но превращается не вся, а несколько меньшая часть. Оставшаяся часть должна выделяться в резисторе, поскольку вся потенциальная энергия конденсатора при разряде должна израсходоваться. Если в качестве резистора поставить электродвигатель, то оставшаяся часть этой поглощенной энергии превратится в магнитную и далее в механическую, т. е. не обязательно в тепловую, и

эта часть энергии равна $CU_0 \Delta U_k$. Очевидно, что если $\Delta U = 0$, то и не будет этой дополнительной энергии, т. е. эта энергия появляется исключительно за счет изменения U_k под действием внешнего поля. КПД такого устройства

$$\eta = \frac{W_{km} - W_k}{W_{km}} = \frac{CU_0 U_{km} - CU_0 U_k}{CU_{km} U_0} = \frac{\Delta U_k}{U_{km}}, \quad (16)$$

где $CU_0 U_{km}$ — энергия, поглощенная в контакте; $CU_0 U_k$ — энергия, выделившаяся в контакте.

Интересно отметить, что при тепловом воздействии $U_k = \alpha T$ и

$$\eta = \frac{\alpha T_1 - \alpha T_2}{\alpha T_1} = \frac{\Delta T}{T_1}, \quad (17)$$

если пренебречь потерями тепла на нагревание конденсатора, т. е. КПД равен КПД цикла Карно.

Для экспериментальной проверки влияния магнитного поля на термоэлектрические параметры нами был выбран кристалл антимонида индия, который имеет высокую подвижность электронов, что позволяет использовать магнитные поля с индукцией не более 0,2 Т. Как показали измерения, удельная термоЭДС $\alpha = 446$ мкВ/К в отсутствие магнитного поля. Образец антимонида индия выполнен в виде пластины толщиной 0,5 мм. Плоскости пластины перпендикулярны направлению (111). На эти плоскости нанесены индиевые электроды для получения антизапирающего контакта. Градиент температуры направлен перпендикулярно этим плоскостям, а вектор индукции магнитного поля направлен параллельно плоскости пластины. Схема установки показана на рисунке. При индукции магнитного поля $B = 0,2$ Т термоЭДС увеличилась почти на 260 мкВ/К, т. е. более чем на 50 %. Однако измерение коэффициента Пельтье показало, что он слабо зависит от магнитного поля (меняется не более чем на 5 %). Это объясняется тем, что при помещении полупроводника в магнитное поле, индукция которого перпендикулярна градиенту температур, в нем возникает поперечная термоЭДС, пропорциональная значению индукции магнитного поля и градиенту температур. Эта термоЭДС наводит на электродах, перпендикулярных градиенту температур, ЭДС которая сильно зависит от магнитного поля. Чтобы исключить эту паразитную ЭДС проводились измерения термоЭДС при двух диаметрально противоположных направлениях индукции магнитного поля, а в качестве значения термоЭДС бралось среднее значе-

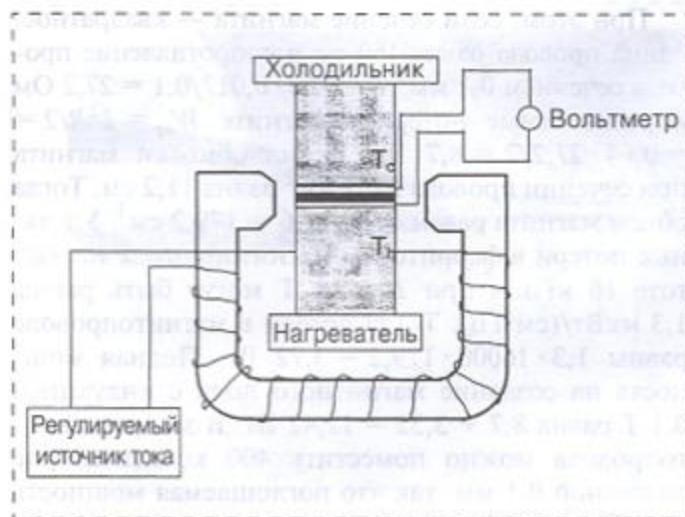


Схема экспериментальной установки для измерения влияния магнитного поля на термоЭДС

ние измеренных ЭДС. В этом случае поперечные составляющие ЭДС, измеренные при противоположных направлениях индукции магнитного поля, взаимно исключались. Тогда было установлено, что при комнатной температуре в кристаллах антимонида индия термоЭДС, как и коэффициент Пельтье, в поперечном магнитном поле с индукцией 0,2 Т изменяется не более чем на 5 %.

Для исследования временных зависимостей электроды кристалла подсоединяли к высокоомному входу осциллографа, который был засинхронизирован с генератором, создающим переменное магнитное поле. На электродах полупроводниковой пластины появлялось напряжение, обусловленное изменением контактной разности за счет изменения магнитного поля (так как термоЭДС и коэффициент Пельтье меняются с изменением магнитного поля).

Так как в диэлектрике присутствуют диэлектрические потери, то это приводит к нагреву конденсатора. Сравним мощность, которая выделяется на конденсаторе в виде теплоты, с мощностью, поглощаемой в контакте металл—полупроводник.

Для этого представим конденсатор в виде последовательно соединенных емкости C и резистора $R_{\text{tg}\delta} = \text{tg}\delta / \omega C$, где $\text{tg}\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь. Мощность, выделяемая на резисторе, равна $\frac{R_{\text{tg}\delta} I_0^2}{2}$. При резонансе ток $I(t)$ и напряжение

$U(t)$ будут находиться в фазе. Тогда $P_- = -\beta B_0 \times (\cos \omega_0 t) / 2$ и ток $I(t) = I_0 \cos(\omega_0 t + \varphi)$ будут находиться в противофазе при $\varphi = 0$, и $I_0 P_- / 2$ будет со знаком минус, т. е. мощность будет поглощаться, что приведет к охлаждению конденсатора. Оче-

видно, что охлаждение будет происходить в том случае, если мощность, выделяемая на $R_{\text{tg}\delta}$, не превысит поглощаемую мощность $I_0 P_- / 2$. Тогда приравняв эти мощности, находим предельное значение тока, превышение которого уже не приводит к охлаждению:

$$\frac{R_{\text{tg}\delta} I_0^2}{2} = I_0 P_- / 2, \text{ т. е.}$$

$$\begin{aligned} \frac{\text{tg}\delta I_0}{\omega C} &= \frac{\text{tg}\delta I_0}{\omega(\epsilon \epsilon_0 S/d)} = \frac{\text{tg}\delta}{\epsilon} \frac{d}{\omega \epsilon_0 S} I_0 = \\ &= \frac{d}{\omega \epsilon_0} \frac{\text{tg}\delta}{\epsilon} j_0 = P_-, \end{aligned}$$

откуда предельная плотность тока

$$j = P_- \frac{\omega \epsilon_0}{d} \frac{\epsilon}{\text{tg}\delta},$$

где d — толщина диэлектрической пленки. Для диэлектриков $\epsilon / \text{tg}\delta \approx 10^6$, при $\omega = 6,28 \cdot 3 \cdot 10^4$ 1/с (30 кГц) и $d \approx 10^{-6}$ м (1 мкм)

$$\begin{aligned} j &= P_- \cdot 6,28 \cdot 8,85 \cdot 10^{-8} 10^6 / 10^{-6} = \\ &= P_- \cdot 15 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2. \end{aligned}$$

Из выражения для j видно, что плотность тока существенно зависит от толщины диэлектрической пленки и от отношения $\epsilon / \text{tg}\delta$. Для $P_- = 0,01$ В $j = 15000 \text{ А/м}^2 = 1,5 \text{ А/см}^2$.

Так как магнитное поле — переменное, оно порождает вихревое электрическое поле, а следовательно, и вихревую ЭДС: $E_{\text{вихр}} = d\Phi/dt = \omega_0 B_0 S_{\text{сеч}}$, где $S_{\text{сеч}}$ — площадь конденсатора в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля. Тогда мощность, расходуемая магнитным полем на нагревание конденсатора, $W_{\text{вихр}} = E_{\text{вихр}}^2 / R$, где R — сопротивление металлической пленки (как наиболее низкоомной) электрода конденсатора, $R = \rho_m l / d l_{\text{ш}}$, где l — длина, а $l_{\text{ш}}$ — ширина конденсатора; $S_{\text{сеч}} = dl$, тогда

$$W_{\text{вихр}} = \frac{1}{2} \frac{(\omega B_0 dl)^2}{\rho_m \frac{l}{dl_{\text{ш}}}} = \frac{1}{2} \frac{\omega^2 B_0^2 d^3 l l_{\text{ш}}}{\rho_m},$$

где ρ_m — удельное сопротивление металла; d — толщина металлической пленки.

Мощность, поглощаемая в контакте,

$$W_{\text{конт}} = P_- I = P_- j S = P_- j l l_{\text{ш}}.$$

Тогда

$$\frac{W_{\text{вихр}}}{W_{\text{конт}}} = \omega \left(\frac{Bd^2}{\Pi_{\Sigma}} \right)^2 \frac{\text{tg} \delta}{\varepsilon \varepsilon_0 \rho_M}.$$

При $\omega = 6,3 \cdot 10^4$ 1/с, $B = 0,1$ Т, $\text{tg} \delta / \varepsilon = 10^{-5}$, $\Pi_{\Sigma} = 10^{-2}$ В, $d = 10^{-6}$ м, $\rho_M = 10^{-8}$ Ом · м.

$$\begin{aligned} \frac{W_{\text{вихр}}}{W_{\text{конт}}} &= 6,3 \cdot 10^4 \left(\frac{0,1 \cdot 10^{-12}}{10^{-2}} \right)^2 \times \\ &\times \frac{10^{-5}}{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-8}} = 0,35 \cdot 10^{-3}, \end{aligned}$$

т. е. мощность, выделяемая в виде тепла из-за вихревых токов, на три порядка меньше мощности, поглощаемой в контакте, и ей можно пренебречь.

Мощность, рассеиваемая на сопротивлении полупроводника, $W_{n/n} = I^2 R_{n/n}$. Тогда

$$\begin{aligned} \frac{W_{n/n}}{W_{\text{конт}}} &= \frac{I^2 R_{n/n}}{I \Pi_{\Sigma}} = \frac{\Pi_{\Sigma} \omega \varepsilon \varepsilon_0 l_{\text{ш}}}{d \text{tg} \delta \Pi_{\Sigma}} \rho_{n/n} \frac{d}{l_{\text{ш}}} = \\ &= \frac{\omega \varepsilon \varepsilon_0 \rho_{n/n}}{\text{tg} \delta}. \end{aligned}$$

При $\omega = 6,3 \cdot 10^4$ 1/с, $\rho_{n/n} = 10^{-3}$ Ом · м, $W_{n/n}/W_{\text{конт}} = 55,7 \cdot 10^{-4}$, т. е. $W_{\text{конт}} \gg W_{n/n}$, и потерями в полупроводнике можно пренебречь.

Рассчитаем теперь энергию, которая необходима на создание магнитного поля $B(t)$. Прежде всего отметим, что на изменение коэффициента Пельтье энергия не затрачивается, так как сила Лоренца перпендикулярна траектории движения электронов. Магнитное поле только перераспределяет холодные и горячие электроны в токе, оставляя их общую энергию неизменной.

Если взять магнитопровод из магнетодиэлектрика, у которого нет насыщения, сечением 16 см^2 и сделать там зазор $l = 1$ см, то поле в зазоре (куда будут помещены холодильные конденсаторы) будет равно

$$B = \frac{IN\mu_0}{l}, \text{ где } N - \text{число витков.}$$

$$\begin{aligned} \text{При } B = 0,1 \text{ Т и } N = 1000 \quad I &= \frac{Bl}{N\mu_0} = \\ &= \frac{0,1 \cdot 10^{-2}}{1000 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7}} \approx 0,8 \text{ А.} \end{aligned}$$

При этом, если сечение магнита — квадратное, длина провода равна 160 см и сопротивление провода сечением $0,1 \text{ мм}^2$ $R = 160 \cdot 0,017/0,1 = 27,2 \text{ Ом}$ и резистивные потери в магните $W_m = I^2 R/2 = 0,64 \cdot 27,2/2 = 8,7 \text{ Вт}$. Длина обмотки магнита при сечении провода в $0,1 \text{ мм}^2$ равна $11,2 \text{ см}$. Тогда объем магнита равен $4 \cdot 4 \cdot 11,6 = 179,2 \text{ см}^3$. Удельные потери в ферритовом магнитопроводе на частоте 16 кГц и при $B = 0,1 \text{ Т}$ могут быть равны $1,3 \text{ мВт}/(\text{см}^3 \text{Гц})$. Тогда потери в магнитопроводе равны $1,3 \cdot 16000 \cdot 179,2 = 3,72 \text{ Вт}$. Полная мощность на создание магнитного поля с индукцией $0,1 \text{ Т}$ равна $8,7 + 3,32 = 12,42 \text{ Вт}$. В зазоре магнитопровода можно поместить 400 конденсаторов толщиной $0,1 \text{ мм}$, так что поглощаемая мощность при $\Pi_{\Sigma} = 0,01 \text{ В}$ равна $0,01 \cdot 400 \cdot 4/2 = 8 \text{ Вт}$. Чтобы поглощаемая мощность превысила потери в магните, толщина конденсатора должна быть сделана в $1,5$ раза меньше, т. е. должна быть не более $0,066 \text{ мм}$. Если магнит делать из высокотемпературного сверхпроводника, то для получения индукции магнитного поля $B = 0,1 \text{ Т}$ при $N = 1000$ и сечении провода $0,1 \text{ мм}^2$ ток должен быть равен 9 А . Потери в сверхпроводящем магните отсутствуют. Поэтому на создание магнитного поля не требуется энергии. Кроме того, конденсаторы в этом случае помещают внутри соленоида, образующего сверхпроводящий магнит.

Переменное магнитное поле можно также создать с помощью постоянных магнитов, движущихся около термоэлектрических конденсаторов. В этом случае затраты энергии на создание переменного магнитного поля будут определяться только добротностью механической системы, создающей движение магнитов, т. е. трением. При использовании подшипников эти потери будут близки к нулю.

Работа выполнена в рамках проекта подпрограммы "Электроника". Код проекта: 208.06.01/& #8470; 107.

Список литературы

1. Юри Р. (Ure Ronald W.) Теория материалов для термоэлектрических и термомагнитных приборов // ТНИЭР. Т. 51. 1963. № 5. С. 702—717.
2. Гаджилаев М. М. ТермоЭДС InSb в поперечном квантовом магнитном поле // Известия вузов. Сер. Физика. № 3. 1993.
3. Гаджилаев М. М. ТермоЭДС n-InSb в поперечном магнитном поле и при большом градиенте температуры // ФТП. Т. 34. 2000. Вып. 5.
4. Уэлдок. Термофотозлектрическое преобразование энергии // ТНИЭР. Т. 51. С. 697—702.
5. Карапетян Г. Я., Катаев В. Ф., Ратушный В. И., Сысоев И. А. Влияние магнитного поля на величину термоЭДС в полупроводниках // Труды Международной научно-технической конференции. "Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века". 11—17 сентября 2000 г., г. Севастополь. С. 34—35.

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВЕ СЕТКИ ИЗ НАНОТРУБОК

Известно, что отдельные одностенные углеродные нанотрубки могут проявлять необычные структурные и электронные свойства. Учеными Naval Research Laboratory (USA) было сделано наблюдение, что сетки одностенных нанотрубок могут проявлять свойства тонкой полупроводниковой пленки. Важную роль при этом играет плотность нанотрубок, так как если она будет слишком низкой, то свойства трубок будут диэлектрическими, и наоборот, металлическими, если трубок будет слишком много. Например, при концентрации одна нанотрубка на 1 мкм^2 сетка имеет свойства полупроводниковой тонкой пленки с подвижностью носителей $10 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Для формирования тонкопленочного транзистора на термически окисленной (толщина 250 нм) кремниевой пластине создавалась сетка неупорядоченных нанотрубок. Методом оптической литографии наносились электроды стока—источка и методом взрывной литографии — титановая пленка толщиной 150 нм. Затем использовался диоксид углерода для удаления нанотрубок из внешней области между электродами тока—источка. Длина канала полученного транзистора — 1–25 мкм, ширина 35–100 мкм. Нанотрубки имели в среднем 1,5 нм в диаметре и 2 мкм в длину.

<http://www.nanotechweb.org/articles/news/2/4/4/1#040403>

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОПИПЕТКИ

Американские ученые политехнического университета Louisville Rensselaer (США) получили наноструктуры нового вида. Данные структуры имеют коническую форму, внутри находится полость постоянного диаметра, поверхность состоит из свернутых графитовых плоскостей. Структуры были получены при изучении кристаллизации углеродных фаз. Подложка с платиновыми проводами помещалась в метан-водородную плазму в реакторе химического осаждения. При этом вокруг кристалла образовывались нанопипетки. Структуры растут в смеси газов метана и водорода (1–2 % метана). Размеры нанопипеток зависят от времени роста, но в любом случае кончик пипетки имеет

наноразмеры и полость постоянного диаметра внутри. Учеными были выращены пипетки длиной от нескольких сотен нанометров до нескольких микрометров с внешним диаметром 200–700 нм, внутренним диаметром 1–20 нм. Оба конца пипетки открыты. Ученые надеются, что дальнейшие исследования помогут им глубже понять механизм образования и роста наноструктур. А исследователи и биологи всего мира уже задумались над использованием новых наноинструментов.

<http://nanotechweb.org/articles/news/2/4/5/1#0710403>

МOTOROLA ВНЕДРЯЕТ ПАМЯТЬ НА НАНОКРИСТАЛЛАХ

Используя традиционную технологию кремниевого осаждения, исследователи лаборатории Motorola создали энергонезависимую 4 Мб-память, основанную на участках кремния размером 5 нм в диаметре. Кремниевые нанокристаллы послужат базой для нового типа энергонезависимой памяти, которая может быть записана и перепрограммируема при меньших затратах напряжения, чем уже существующая. Обычную флэш-память довольно сложно уменьшить, так как размеры конденсаторов ограничены свойствами диэлектрических материалов, образующих его. Для программирования битов через плавающий затвор требуются довольно высокие напряжения (12 В), тогда как в новой памяти ученые обещают уменьшить потребление до 6 В, что позволит в дальнейшем значительно сократить размеры элементов памяти.

<http://www.eet.com/at/n/news/OEG20030331S0023>

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЙ ГРАФИТ ПОГЛОЩАЕТ ВОДОРОД

Японские ученые корпорации Sony создали наноструктурированный графит, способный абсорбировать водород при температуре 20 °С. Данные наноструктуры были получены путем нагревания искусственного графитового порошка с частицами размером 200 нм в течение двух часов при давлении $3,0 \cdot 10^{-4}$ Па. При этом процессе удаляются

примеси. Далее порошок механически измельчался при давлении $2,0 \cdot 10^{-4}$ Па в течение 50 ч. При испытаниях материал поглощал 0,20–0,25 % водорода. Для сравнения обычный графитовый порошок поглощает 0,02 % водорода. Как утверждают ученые, поглощение объясняется диффузией водорода в поры, которые имеют диаметр менее 1 нм.

В связи с этим заметим, что российский ученый В. И. Петрик разработал метод холодной деструкции природного графита [1], заключающийся в том, что в межслоевое пространство графита внедряется химическое соединение, которое под внешним воздействием (химическим, механическим, фотохимическим и др.) способно к экзотермическому взрывообразному разложению. В результате происходит отрыв атомарного углеродного слоя (одного или нескольких), которые могут скручиваться, в частности, в одно- и многослойные трубки. Открытые концы образований, в том числе нанотрубок со свободными связями, весьма активны и процесс идет, как правило, по пути формирования сложно организованных пространственных каркасных форм углерода.

Такой наноструктурированный материал, легированный палладием, является уникальным сор-

бентом водорода [2]. Для легирования наноструктурных соединений разработан способ, основанный на способности металлов платиновой группы образовывать летучие трифторфосфиновые комплексы. Принципиальной особенностью таких комплексов является термическая отдаленность распада конкретного металла платиновой группы. Это позволяет, в частности, осуществлять покрытие нанотрубок структурами как чистыми металлами, так и смесью металлов платиновой группы в заранее заданном процентном отношении.

<http://www.nanotechweb.org/articles/news/2/4/11/1>

Список литературы

1. Петрик В. И. Патент РФ № 2128624 с приоритетом от 17.10.97. Способ получения углеродной смеси высокой реакционной способности и устройство для его осуществления.
2. Неволин В. К., Петрик В. И., Строганов А. А., Чаплыгин Ю. А. Зондовая микроскопия наноструктурированных форм углерода // Тезисы доклада. Второй Международный Симпозиум "Безопасность и экономика водородного транспорта" — IFSSENT-2003. Саров.

В. К. Неволин, д-р физ.-мат наук, проф.,
И. И. Бобринецкий, Н. А. Гирфанова.
E-mail: vkn@miee.ru
<http://www.nanotube.ru>



СТРАНИЧКА РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1998 г. Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 6 за 1998 г. <http://intra.rsfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Численное моделирование трехмерного движения жидкости со свободной или контактной поверхностью и движущимися границами

Номер проекта: 98-01-00484
Год представления отчета: 1999

Реализован метод расчета уравнений гидродинамики с использованием прямоугольной адап-

тивной расчетной сетки, аппроксимации криволинейных границ методом подсеточного разрешения и метод VOF для аппроксимации свободной поверхности. Реализован метод повышенной точности для расчета уравнения конвективного переноса, в основе которого лежит подход восстановления рассчитываемой переменной внутри расчетных ячеек через средние значения по ячейкам. Исследовано влияние способа восстановления на свойства численных схем расчета уравнений мно-

примеси. Далее порошок механически измельчался при давлении $2,0 \cdot 10^{-4}$ Па в течение 50 ч. При испытаниях материал поглощал 0,20–0,25 % водорода. Для сравнения обычный графитовый порошок поглощает 0,02 % водорода. Как утверждают ученые, поглощение объясняется диффузией водорода в поры, которые имеют диаметр менее 1 нм.

В связи с этим заметим, что российский ученый В. И. Петрик разработал метод холодной деструкции природного графита [1], заключающийся в том, что в межслоевое пространство графита внедряется химическое соединение, которое под внешним воздействием (химическим, механическим, фотохимическим и др.) способно к экзотермическому взрывообразному разложению. В результате происходит отрыв атомарного углеродного слоя (одного или нескольких), которые могут скручиваться, в частности, в одно- и многослойные трубки. Открытые концы образований, в том числе нанотрубок со свободными связями, весьма активны и процесс идет, как правило, по пути формирования сложно организованных пространственных каркасных форм углерода.

Такой наноструктурированный материал, легированный палладием, является уникальным сор-

бентом водорода [2]. Для легирования наноструктурных соединений разработан способ, основанный на способности металлов платиновой группы образовывать летучие трифторфосфиновые комплексы. Принципиальной особенностью таких комплексов является термическая отдаленность распада конкретного металла платиновой группы. Это позволяет, в частности, осуществлять покрытие нанотрубок структурами как чистыми металлами, так и смесью металлов платиновой группы в заранее заданном процентном отношении.

<http://www.nanotechweb.org/articles/news/2/4/11/1>

Список литературы

1. Петрик В. И. Патент РФ № 2128624 с приоритетом от 17.10.97. Способ получения углеродной смеси высокой реакционной способности и устройство для его осуществления.
2. Неволин В. К., Петрик В. И., Строганов А. А., Чаплыгин Ю. А. Зондовая микроскопия наноструктурированных форм углерода // Тезисы доклада. Второй Международный Симпозиум "Безопасность и экономика водородного транспорта" — IFSSENT-2003. Саров.

В. К. Неволин, д-р физ.-мат наук, проф.,
И. И. Бобринецкий, Н. А. Гирфанова.
E-mail: vk@miee.ru
<http://www.nanotube.ru>



СТРАНИЧКА РФФИ

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1998 г. Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 6 за 1998 г. <http://intra.rsfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Численное моделирование трехмерного движения жидкости со свободной или контактной поверхностью и движущимися границами

Номер проекта: 98-01-00484
Год представления отчета: 1999

Реализован метод расчета уравнений гидродинамики с использованием прямоугольной адап-

тивной расчетной сетки, аппроксимации криволинейных границ методом подсеточного разрешения и метод VOF для аппроксимации свободной поверхности. Реализован метод повышенной точности для расчета уравнения конвективного переноса, в основе которого лежит подход восстановления рассчитываемой переменной внутри расчетных ячеек через средние значения по ячейкам. Исследовано влияние способа восстановления на свойства численных схем расчета уравнений мно-

гомерного конвективного переноса (схемная вязкость, монотонность). Исследованы критерии адаптации расчетной сетки для моделирования движения жидкости в различных классах задач. Выполнено моделирование движения жидкости в областях со свободными поверхностями и трехмерного движения слабосжимаемого газа с узким фронтом горения. По результатам работы опубликовано 5 статей и зарегистрирован 1 патент.

Бесконечно малые изгибания поверхностей

Номер проекта: 98-01-00688
Год представления отчета: 2001

Основные результаты 2000 года:

- предложен новый способ построения изгибаемых многогранников, позволяющий единообразно строить их в евклидовом и сферическом трехмерных пространствах, а также в трехмерных пространствах Лобачевского и Минковского;
- получено доказательство гипотезы кузнечных мехов для многогранников трехмерного пространства Минковского.

Тестирование точности стабилизации управляемых движений

Номер проекта: 98-01-00355
Год представления отчета: 2001

Получены результаты по методике максиминного тестирования качества управления движением:

Разработана процедура максиминного тестирования точности робастной стабилизации, состоящая из трех этапов:

- предварительный, когда решается максиминная задача, находится цена игры и оптимальная стратегия тестирования;
- основной, когда проводится тестирование точности данного алгоритма робастной стабилизации в рамках имитационного моделирования;
- заключительный, когда сравниваются итоги тестирования на втором этапе с наилучшим результатом первого этапа, а также проводится сравнительный анализ тестируемых алгоритмов стабилизации с оптимальной стратегией, полученной на первом этапе в случае существования седловой точки в соответствующей дифференциальной игре. Разработана система компьютерного тестирования качества управления малым спутником для случая активной магнитной стабилизации углового положения спутника. Развитие математической модели полукружных

каналов вестибулярной системы позволило улучшить качество динамической имитации сенсорного конфликта невесомости для решения задач визуального управления космическими манипуляторами.

Математическое моделирование образования и эволюции структур и формирования свойств пространственно деформируемых многокомпонентных полимерных систем

Номер проекта: 98-01-00480
Год представления отчета: 2001

Разработаны и исследованы параллельные алгоритмы адаптивно перестраивающихся пространственных сеток для эффективного решения масштабно-иерархических задач микромеханики и макроскопического поведения полимерной среды при течении и деформировании. Проведен анализ закономерностей микроструктурных изменений и микродеформационных и прочностных свойств дисперсно-наполненных полимеров и сформулированы условия адгезионного разрушения и кинетики накопления разрывов в полимерной матрице.

Устойчивость установившихся движений и идентифицируемость механических систем

Номер проекта: 98-01-00477
Год представления отчета: 2001

Для уравнений установившихся движений электроэнергетических систем в пространстве полных мощностей обоснован алгоритм отыскания больших по модулю решений в виде специальных степенных рядов. Для трехузловой консервативной электроэнергетической системы полностью решена классическая задача существования режима. Для упругого спутника-гиростата в ограниченной постановке задачи найдено однопараметрическое семейство одноосных ориентаций на притягивающий центр и исследована его устойчивость. Получены достаточные условия различных видов устойчивости и неустойчивости стационарных движений механических систем со скачками вектора состояния, значение и моменты возникновения которых зависят от последнего. Для импульсных систем с амплитудно-частотной модуляцией найдены новые достаточные условия равномерной асимптотической устойчивости. Получены новые теоремы о порядковых и геометрических характеристиках свойств существования сильных линей-

ных конечномерных дифференциальных моделей управления. Развита спектральный анализ идентификационных процессов в классе смешанных задач для линейных динамических объектов нормально-гиперболического типа и исследована проблема оптимальной стабилизации инвариантного множества в задаче высокоточного наведения летательного аппарата с аналоговым рулевым приводом.

Новые информационные технологии в университетском курсе компьютерной графики

Номер проекта: 98-01-00545

Год представления отчета: 2001

При поддержке фирмы Intel в 1999 г. была создана лабораторная база, позволяющая перевести работу по проекту в практическую и экспериментальную плоскость. Успешно прошла экспериментальную проверку концепция дистанционного образования и система электронной поддержки университетских курсов компьютерной графики, базирующаяся на современных информационных технологиях. В 2000 г. подготовлены и опубликованы в Интернете два курса компьютерной графики в МГУ. Осуществлена запись электронного конспекта лекций спецкурса машинной графики, содержащего разделы конкретной математики. Создана электронная библиотека по компьютерной графике. На трех международных конференциях ГрафиКон проведено публичное обсуждение отечественного и зарубежного опыта. Организованы три летние школы по компьютерной графике. Разработана архитектура системы поддержки университетских курсов компьютерной графики, базирующаяся на современных информационных технологиях. Выполнен дизайн Web-страниц конференций, опубликованы материалы. При проведении работ по проекту используются самые современные методы, которые предоставляются новыми информационными технологиями: представление учебных материалов и пособий в электронном виде, доступ к этим материалам по сети Интернет, организация и ведение цифровых библиотек, использование материалов, подготовленных в других (зарубежных) университетах. В МГУ применяется система обеспечения студентов методическими материалами через Web-страницу <http://graphics.cs.msu.su>, открытую на сервере виртуальной учебно-исследовательской Лаборатории компьютерной графики и мультимедиа в МГУ.

Математическое моделирование космических роботов-манипуляторов

Номер проекта: 98-01-00939

Год представления отчета: 2001

- ♦ Разработан язык программирования правых частей обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих движение сложных механических систем, состоящих из твердых тел. Язык реализован на языке программирования C++ в виде библиотеки классов с использованием объектно-ориентированного подхода. С помощью созданного языка разработаны математические модели динамики шестизвенного робота-манипулятора на подвижной космической платформе и плоских движений марсохода. В программах, реализующих модели, предусмотрена возможность распараллеливания вычислительных процессов.
- ♦ Модифицирована система ГЕОМОД для геометрического моделирования двумерных и трехмерных объектов. Она доступна в среде программирования Delphi и в программах на языках C++ и Matlab. Система применялась при исследовании динамики шестизвенного робота-манипулятора на подвижном основании.
- ♦ Исследованы варианты схем гидросистем для мобильных роботов, в которых используются насосы переменной производительности с LS-управлением (load sensing control). Разработаны математические модели, описывающие процессы, протекающие в гидросистемах. Разработан и реализован в виде программы для ЭВМ алгоритм управления мобильным роботом с гидравлической системой управления.
- ♦ Разработаны методы численного интегрирования дифференциальных уравнений движения роботов, учитывающие специфику управления электроприводом с помощью широтно-импульсной модуляции. Методы применялись при математическом моделировании электромеханических систем управления роботов с электродвигателями переменного и постоянного тока.
- ♦ Создано программное обеспечение решения вариационной задачи быстродействия при управлении космическим шестизвенным роботом-манипулятором. В основе программного обеспечения лежит математическая модель робота, построенная с использованием языка программирования правых частей уравнений движения сложных механических систем, управлениями служат моменты в шарнирах манипулятора.

Разработка принципов организации поиска мультимедийной информации

Номер проекта: 98-01-00441
Год представления отчета: 2001

Исследования, проведенные в рамках проекта, были направлены на дальнейшее развитие методов вычисления и сравнения визуальных примитивов. Реализован метод количественной оценки близости статичных изображений по их цветовым гистограммам. Решена задача пространственного сег-

ментирования изображения. Разработан и реализован алгоритм, осуществляющий вычисление параметров форм для выделенных объектов картинки и сравнение форм по их параметрам. В результате проведенных работ получены результаты, которые позволяют выполнять локальное индексирование, отражающее распределение на изображении цветных множеств. Для вычисления измерений текстур исследованы возможности использования метода функций Габора и характеристик матрицы взаиморасположения оттенков серого цвета.



Производство и продажа радиоэлектронной аппаратуры Поставка электронных компонентов

- ☐ Многофункциональные телефоны с АОН серии "Phone MASTER" (не требуют питания 220 В)
- ☐ Система охраны и контроля с оповещением через сеть сотовой связи стандарта GSM "Страж-GSM"
- ☐ Телефонные коммутаторы и микро-АТС серии "Quadro" (не требуют питания 220 В)
- ☐ Устройства защиты телефонной линии серии "Блокиратор" (не требуют питания 220 В)
- ☐ Миниатюрные цифровые диктофоны на FLASH-памяти
- ☐ Множество полезных устройств, изделий и комплектующих для монтажа радиоэлектронной аппаратуры.

У нас Вы найдете то, что нужно!

- Для квартиры, загородного дома, небольшого офиса — мини АТС (всего за \$30—\$50), охранная система с оповещением на Ваш сотовый номер (всего \$125!), отличный многофункциональный телефон с АОН, цифровым (!) автоответчиком и компьютерным интерфейсом (всего \$80).
- Для автомобиля — система охраны и контроля с оповещением на Ваш сотовый номер (всего \$125!).
- Для студентов и бизнесменов, для всех любопытных и любителей новинок электроники — миниатюрные цифровые диктофоны на FLASH-памяти (от \$115). Записываем лекции, переговоры, все что угодно — и все это умещается в спичечном коробке. От 2 до 150 часов непрерывной записи, вечное хранение, компьютерный интерфейс.
- Большой выбор различных электронных устройств и комплектующих. Зайдите на наш сайт и позвоните в офис!

Наш адрес: Москва, ул. Профсоюзная, д. 82, офис 107
тел.: (095) 740-9551, тел./факс: 334-8434

Проезд до станции метро "Калужская", первый вагон из центра, сразу возле выхода из метро (в помещении архива РГАНТД, центральной вход)

e-mail: info@glasinfo.ru
<http://www.glasinfo.ru>

CONTENTS

Putilov A. V. <i>On the Development of the Works in Russia in the Area of Nanomaterials and Nanotechnologies</i>	2
---	---

The materials of the report in the condition and the development of nanotechnology and nanomaterials creation discussed in the meeting of the Ministry of the industry, science and technologies of Russia Federation are stated.

Atlasov K. A., Veiko V. P., Kalachev A. I., Kaporsky L. N. <i>Laser-Based Technology of Forming the Near-Field Optical Probes</i>	5
--	---

The implementation of the scanning probe microscopy and the near-field microscopy based devices introduces new possibilities in micro and nanoelectronics. The main operating tool is the probe (for instance, a tapered optical fiber) with the apex dimensions of ~100 nm. In the present paper the investigations of the laser-based technology for probe forming are carried out. These investigations are aimed at the manufacturing process study, since its parameters are of vital importance for the probe quality, technical characteristics and reproducibility.

Mokrov E. A. <i>The Problems and Prospects of the Sensor Development</i>	11
---	----

The requirements for sensing and transducing instruments (STI) designed for rocket-space technology are summarized. The principal trends of STI improvements based on advanced technology are presented.

Verner V. D., Purtskhvanidze I. A. <i>Technological Modules in Microsystems Engineering</i>	17
--	----

Principals of constructive and technological modules creation in Microelectronics and Microsystems techniques are introduced and considered. Thesis related to priority of constructive type modules for Microelectronics and preference of technological type modules for Microsystems Engineering substantiated.

Safronov L. N., Ilitsky M. A. <i>Properties of Defects in Silicon Nanocrystals and Properties of a Nanocrystals With Defects</i>	22
---	----

The configurations of the silicon nanocrystals with sizes about 10^2 – 10^4 atoms with maximal absolute value of binding energy were found by the gradient-search method. Surface atoms were either free or dimerized or fixed by the solid matrix. The atomic interactions in the cluster were described by the Tersoff's empirical interatomic potential. Surface energy for (100), (110), and (111) surfaces of silicon have been calculated. It has been shown that dimerization of free surface Si(100) sufficiently (doubly) decreases the surface energy.

The formation energies of the simple defects in the nanocrystals of various sizes have been calculated.

The hydrostatic pressure dependence of the bulk modulus of elasticity has been studied. It has been shown that at hydrostatic positive or negative pressure, it may be the configurational transition of vacancy or of interstitial. It has been shown that the configurational transition lead to step change of the value of the bulk modulus of elasticity. Moreover the value of this step change is inversely as the number of the nanocrystal atoms.

The trends of the development of the modern tribology on micro- and nanolevels are indicated. The problems are disclosed and the directions of their solutions are given, and also it's shown their correlation with the traditional tribology.

Shalobaev E. V. <i>Microsystems and Development of the Modern Tribology</i>	26
--	----

The trends of the development of the modern tribology on micro- and nanolevels are indicated. The problems are disclosed and the directions of their solutions are given, and also it's shown their correlation with the traditional tribology.

Valiev K. A., Kalinov V. A., Kirjanov V. A., Malitsev P. P. <i>Optical Interferometers in the Integral Micromechanics</i>	28
--	----

The method of an optical interferometry with reference to making of countermeasure feelers of microsystem engineering surveyed on the basis of use of mobile diffraction gratings.

Noyojilov E. V. <i>On Reduction to Simplified Form of Differential-Algebraic Equations for Circuit Simulation</i>	30
--	----

We consider linear differential-algebraic equations (DAEs) with the variable coefficients that satisfy the special conditions of constant rank. These systems arise particularly in such applied mathematical problems as circuit simulation, chemical reactions modeling and different vehicle system dynamics simulation (on macro-level as well). There's suggested a method for reduction of considered systems to simplified form. The reduction is based on an iteration method. It is applicable for the systems with arbitrary index value and can be used for numerical solution of DAEs when modeling listed above processes.

Dneprovskiy V. G., Karapetjian G. Ia., Pustovalov G. A., Lysenko M. V. <i>The Research of Thermoelectromotive Force from the Magnetic Field in the Transistor Crystal</i>	38
--	----

The processes of the condenser charging and discharging are considered. One facing of this condenser is made from the metal and the second one is made from the metal electrode is plotted from the outer side.

Подписку за рубежом принимают:

For foreign subscribers:
ЗАО МК-Периодика. E-mail: info@periodicals.ru;

Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev
Index 79493.

Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: (7 095) 269-5510.