

МСТ

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 6 ✦ 2004**ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ****Журнал выпускается при научно-методическом руководстве****Отделения информационных технологий и вычислительных систем****Российской Академии наук****Издается с 1999 г.
ISSN 1684-6419****Главный редактор**

Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора

Лучинин В. В.

Редакционный совет:

Аристов В. В.
Васильев В. В.
Гапонов С. В.
Каляев И. А.
Климов Д. М.
Лифшиц В. Г.
Мокеров В. Г.
Никитов С. А.
Чаплыгин Ю. А.

Редакционная коллегия:

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

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Безменова М. Ю.
Григорин-Рябова Е. В.

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

Порядок оформления статей, направляемых в журнал "Микросистемная техника"	2
НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ	
Самойлович М. И., Клещева С. М., Белянин А. Ф., Житковский В. Д., Цветков М. Ю. Трехмерные нанокомпозиты на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема. Часть I	3
Бакунов М. И., Бодров С. Б. Межмодовая трансформация в зонде ближнепольного оптического микроскопа	7
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ	
Щербаков А. В., Мельников Л. А. Стекловолоконные технологии в микросистемной технике и фотонике.	13
Парилов А. А., Поддубнов В. В. Полусферические магнитотвердые пленки сплава Nd—Fe—B и их применение в микросистемах.	17
КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ	
Драгунов В. П. Нелинейная модель упругого элемента микроэлектромеханических систем.	19
Крупкина Т. Ю. Методика анализа пьезорезистивного эффекта в элементах микросистемной техники с использованием пакета программ ISE TCAD	25
СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ	
Адамов Ю. Ф., Сомов О. А., Шевченко Е. А. Современная технология и производство систем на кристалле	28
ЭЛЕМЕНТЫ МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ	
Котов В. Н., Нещадим И. Л., Борисов С. Э., Клиндухов В. Г., Черепахин И. И. Комплект микроэлектронных унифицированных датчиков физических величин для электронных и электрических систем автомобильной техники	32
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА	
Уrbaitis M. F. Обнаружение и идентификация молекулярных и атомных примесей без предварительной подготовки объекта исследования в реальном масштабе времени	39
ИНФОРМАЦИЯ	
Contents	45
Contents	48

Журнал включен в перечень научных и научно-технических изданий ВАК РоссииАннотации статей журнала на русском и английском языках и требования к оформлению
статей доступны на сайте журнала: <http://www.microsystems.ru>.**ПОДПИСКА:**

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

ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В ЖУРНАЛ "МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА"

Объем статьи, направляемой в редакцию, не должен превышать 15 страниц машинописного текста (27 000 знаков и пробелов), включая таблицы и список используемой в ссылках литературы; число рисунков – не более 10.

В статье должны быть изложены результаты работы, проделанной авторами, без излишних подробностей, повторов, подробных выводов формул. Статья должна предваряться краткой **аннотацией**.

Структурно статья должна иметь четко выраженное **введение**, в котором ставится задача (описывается подлежащая решению проблема), **основную часть**, где излагаются используемые авторами пути решения поставленной задачи, приводятся и обсуждаются результаты, и **заключение**, в сжатой форме подводящее итог работы. В конце статьи приводится **список литературы**.

Размерность всех характеристик приводится в системе СИ. Все **аббревиатуры**, сокращения и условные величины расшифровываются в тексте. Названия иностранных фирм и организаций даются в транскрипции первоисточника с указанием страны. **Иллюстрации и таблицы** сопровождаются подписями и ссылками в тексте. Все буквенные или цифровые обозначения, приведенные на рисунках и графиках, поясняются в основном тексте или подрисуночной подписи. **Латинские знаки** в формулах и обозначениях (как в тексте, так и на рисунках) набираются курсивом.

Надстрочные и подстрочные индексы следуют поднимать вверх или опускать вниз (не набирать в строку). **Графы в таблицах** должны иметь краткие заголовки. Упоминаемые в заголовках величины сопровождаются соответствующими единицами измерений. **Однотипные таблицы** строятся одинаково.

В **списке литературы** указываются фамилии и инициалы авторов, точное название книги или сборника, издательство, год и место издания, а для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, название статьи источника, год выхода и номер журнала. Ссылки на иностранную литературу даются в латинской транскрипции без сокращений. Источники в списке располагаются в том порядке, в каком на них проходили ссылки в тексте.

К статье должны быть приложены **сведения об авторах**: фамилия, имя и отчество (полностью), почтовый адрес (индекс обязателен), учебная степень, должность и место работы, телефон (служебный и домашний), e-mail, акт экспертизы. Число авторов не более трех от одной организации и не более пяти от нескольких.

В редакцию статья представляется на диске 3,5" или CD-ROM. Текст статьи набирается в текстовом редакторе *MS Word for Windows*. Рисунки представляются в форматах TIFF (желательно), PCX или BMP с наименьшим разрешением 300 dpi для штриховых изображений и 600 dpi для фотографий. Кроме диска нужно представить распечатку статьи с подписями всех авторов.

Можно прислать статью **по электронной почте**, но затем выслать в адрес редакции распечатку с подписями всех авторов. Наш электронный адрес: it@novtex.ru.

Уважаемые авторы, представляя рукопись в редакцию, Вы передаете издателю право на ее публикацию в журнале. Направление в редакцию работ, опубликованных ранее или же намеченных к публикации в других изданиях, не допускается.

Материалы, не соответствующие данным требованиям, к публикации не принимаются. Рукописи не рецензируются и авторам не возвращаются.

ФАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 539.2+621.38

М. И. Самойлович, д-р физ.-мат. наук,
С. М. Клещева, канд. геолого-минералог. наук,
А. Ф. Белянин, д-р техн. наук,
В. Д. Житковский, канд. техн. наук,
М. Ю. Цветков,
ЦНИТИ "Техномаш", г. Москва,
e-mail: samoylovich@technomash.ru

ТРЕХМЕРНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ УПОРЯДОЧЕННЫХ УПАКОВОК НАНОСФЕР КРЕМНЕЗЕМА.

Часть I.

Разработана технология получения упорядоченных упаковок из монодисперсных частиц кремнезема, что позволило на их основе создать новые типы материалов — трехмерные сверхрешетки, в том числе так называемые "фотонные кристаллы", или материалы с фотонной запрещенной зоной.

Эксперименты по заполнению межглобуллярного пространства полупроводниковыми, сверхпроводящими, оптически активными, ферромагнитными и другими материалами осуществлялись специально разработанными методами. Показано, что созданные уникальные трехмерные наносистемы обладают квантоворазмерными и другими наномасштабными эффектами, например, нелинейным взаимодействием между индивидуальными нанокластерными подсистемами.

Введение

Как известно, любые интегральные схемы являются фактически высокоорганизованными композитными структурами, и поэтому в начале технических разработок в области микроэлектроники наиболее подходящими материалами были соединены монокристаллы, однако со временем оказалось, что жесткий внутренний порядок кристалла вносит серьезные ограничения в технологические процессы. Естественной реакцией был переход к планарным технологиям, широкому использованию пленочных структур и других подобных материалов, т. е. фактический отказ от объемных (трехмерных) систем. Поэтому основой современной твердотельной электроники являются планарные (2D) технологии, а для дальнейшего увеличения плотности элементов необходим переход либо к трехмерным (3D) наносистемам, либо к молекулярной электронике. Так, физико-химические методы, основанные на принципах самоорганизации

наноприборов, позволяют довести объемную плотность элементов в 3D-системах до $1 \cdot 10^{14}$ — $5 \cdot 10^{14}$ см³ (при поперечных размерах элементов от десятков до сотен нанометров). Такие композиты, кроме всего прочего, работают при плотностях тока на 3—4 порядка ниже, чем в планарных системах. И хотя за счет использования различных видов литографии и ускорительной техники удалось добиться выдающихся результатов по миниатюризации полупроводниковых элементов, в настоящее время планарные технологии достаточно близко приблизились к своим физическим границам, а следовательно, неизбежен возврат к трехмерным наносистемам (nanoэлектроника).

В литературе имеется большое число работ, посвященных изучению нанокристаллических пленок и нанокристаллических материалов, например кремния, а именно — исследованию их наномасштабных свойств и квантоворазмерных эффектов. Отсутствие до самого последнего времени трехмерных сверхрешеток привело к тому, что фактически все работы в этой области относятся к достаточно тонким (по толщине) нанокомпозитам. Создание трехмерных высокоупорядоченных (на уровне кристаллических структур) наносистем оказалось довольно трудным делом, поскольку имелся как бы разрыв между размерами структурных пустот (например, в цеолитах 1—1,5 нм) и пористыми системами различного типа, в которых размер пустот можно регулировать, но невозможно создать высокоупорядоченные системы. Лишь в последние десять лет эта проблема начала находить свое решение. Оказалось, что природа создала такой материал, хотя совершенно для других целей, — благородный опал. Такие опалы представляют собой плотноупакованные (в основном по кубическому закону) наносферы кремнезема (очень близкие по диаметру), размеры которых в различных образцах могут варьироваться от 200 до 600 нм. Регулярная упаковка глобул кремнезема образует трехмерную решетку с указанной периодичностью, которая может быть охарактеризована как 3D-оптическая сверхрешетка, а вся система в целом — как "оптический" или "фотонный" кристалл (дифракция в оптическом диапазоне). При указанных диаметрах сфер такие упаковки содержат структурные пустоты размерами 160—400 нм, которые могут быть частично или полностью заполнены полупроводниковыми, сверхпроводящими, оптически активными, магнитными и другими материалами. Таким образом, в опаловидной структуре будет образовываться трехмерная сверхрешетка из частиц материала заполнения (размер кластеров может варьи-

роваться от 10 до 180 нм). Именно таким способом впервые были получены действительно трехмерные нанокомпозиты с характерной наномасштабной структурой.

В ряде работ опаловые матрицы рассматриваются как самоорганизующиеся системы. Известный специалист в этой области *J. D. Joannopoulos* пишет в журнале "Nature" (2001 г.): "Опалы делают это, даже биомолекулы делают это, так почему самоорганизующие системы не могут использоватьсь для создания фотонных кристаллов с почти совершенным порядком? Новая технология показывает, что абсолютный порядок не требует абсолютного контроля" [1]. Интерес, в конечном итоге, связан с задачами нанотехнологии, особенно в части перехода к трехмерным системам. Дело в том, что стандартные приемы реплицирования (повторения) с использованием методов литографии становятся неприменимыми для 3D-наноструктур. В этом случае невозможность применения поверхностного монтажа, так же как и автоматизированных систем сборки, не оставляет иных вариантов, кроме использования механизмов самоорганизации, аналогичных действующим в биологических системах. В этом смысле опаловая матрица представляет собой упрощенный вариант самоорганизующейся системы — 3D-нанорешетку, поскольку такая структура является одновременно реплицирующей матрицей для других материалов. Появляется возможность создания 3D-фотонных кристаллов на основе опаловых матриц с определенными функциональными свойствами.

Уже к концу 90-х годов технология получения опаловидных материалов с размерами "моноクリстальных" (т. е. регулярных высокоупорядоченных упаковок) областей до нескольких десятых долей кубического сантиметра была разработана группой ученых. Хотя с начала девяностых годов созданием систем на основе наносфер SiO_2 со структурой благородного опала занималось несколько групп [2, 3], получить объемные образцы опаловых матриц, достаточно прочные и устойчивые к температурным воздействиям, удалось в ЗАО "Алмазтехокристалл" (г. Александров) Л. А. Самойлович. В дальнейшем эти работы были продолжены в ЗАО "Опалон" (г. Москва) М. И. Самойловичем и А. В. Гурьяновым и в ОАО ЦНИТИ "Техномаш" (г. Москва) М. И. Самойловичем и С. М. Клещевой.

Как и следовало ожидать, достаточно быстро появились работы по использованию органических материалов для получения наносфер и по созданию на их основе систем со структурой благородного опала. Более того, в связи с простотой и дешевизной использования таких материалов, особенно при получении пленочных (планарных) структур с фотонной запрещенной зоной, слово

"опал" чаще всего применяется к такого рода системам; соответственно велись работы и по созданию планарных упаковок наносфер SiO_2 [4]. Приведенные в последние годы исследования подтвердили правильность подхода и позволили как получить нанокомпозиты с необычными характеристиками, так и исследовать для целого ряда физических свойств квантовые и квантоворазмерные эффекты, обусловленные электронным и электронно-фоновым взаимодействием между индивидуальными электронными подсистемами кластеров размерами 30—100 нм, образующих трехмерную сверхрешетку в такого рода опаловидном нанокомпозите.

Особенности получения 3D-наноструктур на основе опаловых матриц

Поскольку природные опалы не содержат сколько-нибудь значительных областей с регулярной решеткой, а пустоты заполнены кремнеземом и молекулярной водой, основная трудность заключалась в разработке технологии получения синтетических опалов с регулируемыми размерами наносфер кремнезема и структурных пустот, чьи высокоупорядоченные упаковки образовывали бы области с размерами, достаточными для проведения необходимых физико-технических исследований и макетирования. Назначение благородного опала, как ювелирного сырья, отразилось как в способе получения, так и в его структурных особенностях, неприемлемых для технического опала (нанокомпозита). Поэтому с использованием некоторых технологических приемов синтеза ювелирного опала была разработана технология получения нанокомпозита на основе опаловой матрицы.

Методика получения опаловых матриц, или технического опала, подробно описана в [5]. Перечислим лишь принципиальные моменты, отличающие синтез ювелирного опала от технического. На стадии синтеза монодисперсной суспензии исходные реагенты подвергаются более глубокой очистке и, в первую очередь, это относится к тетраэтоксисилану (ТЭОС). Для очистки использовались как ранее известные [6], так и модифицированные нами способы очистки ТЭОС. При этом расход эфира на синтез технического опала увеличивается по сравнению с ювелирным иногда на порядок и более. Также заметим, что создание необходимого соотношения моно- и димеров кремнезема в ТЭОС достигалось дозируемой полимеризацией мономеров, которые предварительно получаются отделением фракций эфира при заданной температуре кипения (методом перегонки). Выпускаемый промышленностью эфир не представляет собой чистый мономер, поскольку при частичной гидролизации за счет поглощения влаги воздуха ТЭОС содержит полимерные формы, комплексы

воды и спирта, примеси металлов, снижающие монодисперсность суспензии. Поэтому необходим контроль за его составом по полосам поглощения в ИК области, характерным для моно-, ди- и тримеров (контроль по интегральному коэффициенту поглощения в ИК области: полоса 612 см^{-1} — для димеров, 650 см^{-1} — для мономеров, 589 см^{-1} — для тримеров).

Основное отличие в получении технического опала от ювелирного состоит в том, что осаждение монодисперсных частиц SiO_2 достигается использованием метода седиментации при отсутствии вибраций, тепловых конвекций. Хотя особого внимания требует подготовка подложки (обеспечение требуемых степени шероховатости, плоскопарALLELНОСТИ, состава), главное в технологии получения технического опала — это способ упрочнения упорядоченного опаловидного материала. Если в ювелирном опале основное упрочнение достигается пропиткой кремнезолями, склеивающими частицы, которые заполняют межглобуллярное пространство в опаловой матрице, то в техническом опале такой подход совершенно неприемлем, поскольку поровое пространство должно быть свободно, а посторонние примеси недопустимы. Поэтому была разработана многоступенчатая профильная обработка сырья, параметры обработки которой зависят от многих факторов, в том числе от толщины осадка, размера частиц, назначения материала и т. д.

В рамках такого подхода была отработана методика инструментального контроля качества опаловых матриц — кубических упаковок наносфер SiO_2 с использованием спектров брэгговского отражения в оптическом диапазоне (по полуширине соответствующей полосы — см. рисунок). Опаловые матрицы представляют собой трехмерные дифракционные решетки, распространение света в которых подчиняется закону Брегга, а нарушения этого закона имеют место в том случае, если опаловая матрица характеризуется доменной разупорядо-

ченной структурой. В случае однородных образцов имеет место хорошо сформированный спектр отражения, полуширина которого позволяет оценивать степень совершенства опаловой матрицы. Установка для измерения спектров отражения включает следующие компоненты:

- юстируемый держатель образцов опаловых матриц;
- источник "белого света";
- юстировочную оптику;
- монохроматор;
- блок фотоприемника;
- персональный компьютер.

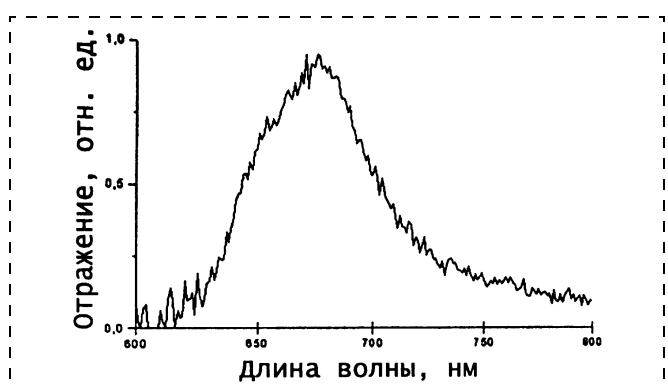
Исследуемый образец устанавливается в держателе таким образом, чтобы отраженный от него сигнал был бы приблизительно направлен на входное окно монохроматора.

Сканируя спектральный диапазон монохроматора, можно "поймать" отраженный от образца сигнал и отьюстировать его по максимуму сигнала. Записав спектр отражения опаловой матрицы с выводом информации на персональный компьютер, можно оценить качество опаловой матрицы в зависимости от полуширины спектра отражения. Количественные критерии оценки задаются в зависимости от предъявляемых требований к качеству образцов.

Опаловые матрицы как материалы с фотонной запрещенной зоной

Подобно тому, как открытие материалов с полупроводниковыми свойствами соотносится с такими понятиями, как разрывы функции плотности состояний электронов и зонная структура, в свою очередь обусловленных локализацией электронов и периодическим строением, появление материалов с фотонной запрещенной зоной — МФЗЗ (фотонных кристаллов) также соотносится с таким свойством, как локализация света, ведущим к появлению фотонных зон (а следовательно, к разрывам функций плотности состояний электромагнитных мод) в системах с периодическим изменением диэлектрической постоянной (показателя преломления). Само по себе понятие локализации электронов было введено в пионерских работах Андерсена [7] и Мотта [8], а в случае световых потоков (электромагнитных волн) на это явление было обращено внимание в работе Быкова [9], а в последовательной форме — Яблоновичем [10] и Джоном [11]. Практически сразу, а именно с середины 90-х годов прошлого столетия, стали рассматриваться эффекты ближнепольной оптики, также связанные с явлением локализации света [12].

Фотонные кристаллы являются новым классом материалов (для наноэлектроники и оптоэлектроники), чьи свойства определяются периодично-



Спектр брэгговского отражения опаловой матрицы

стью изменения диэлектрической константы ϵ , что при определенных условиях (например, это могут быть правильные кубические упаковки наносфер различных веществ) приводит к образованию "фотонных зон". Физический смысл этого явления обусловлен не только периодичностью ϵ , но и зависимостью фазовой скорости распространения света (фотонов) от ϵ , что в совокупности приводит к когерентному распространению света и к появлению "запрещенных" частот в зависимости от направления распространения света, т. е. к зонной структуре. В отличие от обычных кристаллов брэгговская дифракция для фотонных кристаллов имеет место не в рентгеновском диапазоне, а в оптической области, при этом края аналогов зон Бриллюэна играют роль брэгговских плоскостей.

Следует отметить следующие принципиальные особенности материалов с фотонной запрещенной зоной, обусловленные такими их общими свойствами, как формирование зон фотонных состояний, запрет спонтанной эмиссии в определенных частотных диапазонах и необходимость учета того, что статистика фотонных состояний является статистикой Бозе—Эйнштейна. В первую очередь стоит отметить нарушение фермиевского "золотого правила" гладкости и непрерывности функций плотности состояний для поглощения и излучения света, а соответственно неприменимости к МФЗЗ скоростного уравнения Эйнштейна, согласно которому в обычном вакууме скорости стимулированного излучения и поглощения равны и отношение N_2/N имеет верхнюю границу $1/2$ (здесь $N = N_1 + N_2$ — общее число возбужденных N_2 и невозбужденных N_1 атомов). Поэтому в МФЗЗ может быть достигнута почти 100% -ная инверсия даже в двухуровневой системе, причем при низких уровнях когерентной накачки, поскольку плотность состояний имеет значительный разрыв (ширина запрещенной зоны может достигать $15\text{--}25\%$ от центральной частоты). Отсюда для таких материалов не столь существенны "проблемы" с мощностью накачки и нагревом, поскольку они характеризуются малыми скоростями переключения, уменьшением некогерентной релаксации и рассеяния, а также значительным снижением дефазировки.

Введение нанокластеров типа квантовых точек в диэлектрические решетки и особенности распределения лазерных мод вблизи границы зон позволяют сделать так, чтобы, с одной стороны, электронная подсистема квантовых точек соотносилась ("воспринимала") с фотонной плотностью состояний, а с другой — имело место слабое их взаимодействие с решеткой диэлектрического каркаса (в этом случае уменьшаются эффекты разрушения дефазировки и нагрева).

Обычно черное излучение (химический потенциал $\mu < 0$ в статистике Бозе, а волновые функции симметричны) рассматривается как фотонный "газ" при слабом взаимодействии фотонов друг с другом и с веществом, за исключением частот, соответствующих сравнительно узким полосам поглощения вещества. Для МФЗЗ с широкими запрещенными зонами это приближение не выполняется, поскольку плотность фотонных состояний вне запрещенной зоны может значительно превосходить плотность мод в обычном вакууме (значительно уменьшаясь в запрещенной зоне). Отсюда следует неприменимость для МФЗЗ как стандартной формулы Рэлея—Джонса для малых частот ($\hbar\omega \ll T$), так и формулы Вина для больших частот. Соответственно, значительно искажается не только функция плотности излучения, но и функция распределения энергии черного излучения по частотам, а следовательно, и зависимость ее максимума от температуры.

В равновесии все неотраженное излучение (для обычных оптических материалов) есть поглощение, если нет флюоресценции и сильного рассеяния, при этом поглощенная энергия должна компенсироваться испусканием излучения этим же телом. Однако в МФЗЗ наличие сильной локализации приводит к совершенно иным закономерностям для рассеяния световых потоков, различным для коротковолнового и длинноволнового компонентов, существенно отличающимся как от релеевского, так и от стандартного случая геометрической оптики. Так, коэффициент отражения в МФЗЗ при указанных условиях для длинноволновой части будет пропорционален ω^2 (а не ω^4 , как для релеевского рассеяния), при этом поведение коротковолнового компонента описывается стандартными законами геометрической оптики. В общем случае такой материал не поглощает определенные частоты, что формально соответствует положительному значению реальной части диэлектрической постоянной (частотное окно).

Привычная формулировка, например, закона Киргофа об универсальности (т. е. независимости от природы вещества) соотношения энергии излучения и поглощения от частоты и температуры становится непригодной, поскольку в МФЗЗ функция плотности перестает быть гладкой (в частности, становится кусочно-гладкой). В зависимости от частоты тело "приближается" или "удаляется" по своим характеристикам для излучения или поглощения от закономерностей черного тела. Соответственно меняется и формулировка закона Вина о смещении положения максимума функции распределения энергии излучения в сторону коротких волн с ростом T . Такие явления, в общем-то, известны для полос сильного излучения (поглоще-

ния), но в МФЗЗ они наблюдаются уже не для узкого диапазона частот, а в ситуации со значительной плотностью состояний и с возможной инверсией в стационарных условиях.

Список литературы

1. **Joannopoulos J. D.** Self-assembly lights up // Nature. 2001. V. 414. P. 257–257.
2. **Miguez H., Blanco A.** et al. Face centered cubic photonic bandgap materials based on opal — semiconductor composites // J. Lightwave Technol. 1999. V. 17. N 11. P. 1975–1981.
3. **Yoshino K., Tatsuhara S.** et al. Amplified spontaneous emission and lasing in conducting polymers and fluorescent dyes in opals as photonic crystals // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. N 18. P. 2590–2592.
4. **Romanov S. G., Maka T.** et al. Thin film photonic crystals // Syntetic Metals. 2001. V. 116. P. 475–479.
5. **Самойлович С. М.** Автореферат диссертации. М.: МГУ. 1999.
6. **Рябенко Е. А., Кузнецов А. И.** О распределении примесей между фазами при глубокой очистке ТЭОС раствором аммиака // ЖПХ. 1977. № 7. С. 1625–1627.
7. **Anderson P. W.** Absence of Diffusion in Certain Random Lattices // Phys. Rev. 1958. V. 109. N 5. P. 1492–1505.
8. **Mott N. F.** Electrons in Disordered Structures // Adv. Phys. 1967. V. 16. N 61. P. 49–144, and Mott N. F. Conduction in Non-crystalline Systems. I. Localized Electronic states in Disordered Systems // Philos. Mag. 1968. V. 17. N 150. P. 1259–1268.
9. **Быков В. П.** Спонтанное излучение в среде с полосным спектром // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 7. С. 1557–1577.
10. **Yablonovitch E.** Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. N 20. P. 2059–2062.
11. **John S.** Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. N 23. P. 2486–2489.
12. **Miyazaki H., Ohtaka K.** Near-field images of a monolayer of periodically arrayed dielectric spheres // Phys. Rev. B. 1998. V. 58. N 11. P. 6920–6937.

Продолжение см. в следующих номерах.

УДК 535.131:537.876.4

М. И. Бакунов, д-р физ.-мат. наук, **С. Б. Бодров**,
Нижегородский государственный университет
им. Н. И. Лобачевского

МЕЖМОДОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ В ЗОНДЕ БЛИЖНЕПОЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА*

Исследовано прохождение оптического излучения через зонд ближнепольного микроскопа — заостренный металлизированный конец оптоволокна — с учетом межмодовой трансформации и отсечки мод. В результате численного расчета на основе метода поперечных сечений показано, что в типичном зонде с углом сходимости $\sim 10^0$ в HE₁₁ моду, обладающую минимальным критическим радиусом, трансформируется лишь несколько процентов от мощности основной моды волоконного световода. В этом и состоит основная причина низкой пропускной способности зондов. Предложены несложные реализуемые технологические варианты профилирования оконечной части зонда, повышающие коэффициент трансформации в HE₁₁ моду и обеспечивающие увеличение пропускной способности зонда на порядок.

Введение

Ближнепольная сканирующая оптическая микроскопия (БСОМ) — активно развивающееся направление сканирующей зондовой микроскопии. Наиболее распространенным и хорошо разработанным методом БСОМ является апертурная БСОМ, применяемая, в частности, во всех

коммерческих ближнепольных микроскопах (см. обзоры [1, 2]). В апертурной БСОМ поверхность исследуемого образца зондируется "язычком" ближнего светового поля, формируемого оптическим зондом — как правило, это заостренный (под углом $\sim 10^0$) конец оптоволокна, боковая поверхность которого покрыта непрозрачным слоем металла (обычно алюминия), а вершина открыта и образует выходную апертуру диаметром 30–100 нм. Пропус-

кая свет через сужающуюся металлическую "воронку" зонда, удается локализовать световое поле на масштабах, много меньших длины световой волны, и преодолеть тем самым дифракционный предел обычной оптики — пространственное разрешение ближнепольного микроскопа примерно равно размеру выходной апертуры зонда.

Волоконный зонд, важнейший элемент ближнепольного микроскопа, изготавливается путем термического вытягивания или химического травления оптоволокна [2–5]. Основное достоинство второго способа — сохранение неизменным радиусом центральной жилы (сердцевины) сужающегося волокна вплоть до полного истончения стеклянной оболочки вокруг жилы, что обеспечивает лучшую локализацию направляемой волокном моды в центральной части волокна и, как следствие, меньшие омические потери в металлическом покрытии зонда [2, 6].

Одной из основных проблем апертурной БСОМ является низкая пропускная способность оптических зондов (коэффициент прохождения света через зонд

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант НШ 1641.2003.2

по мощности составляет обычно 10^{-6} – 10^{-3} [1–6]), обусловленная тем, что оконечная часть зонда (по сути, металлизированного диэлектрического волновода) в силу своего малого радиуса является критической для всех мод данного волновода, в том числе и для обладающей минимальным критическим радиусом моды HE_{11} (иногда не вполне строго называемой TE_{11} модой [3, 6]). По мере распространения света в сужающемся зонде происходит последовательная отсечка мод, в результате чего выходной апертуры достигает лишь малая часть сканирующей HE_{11} моды (вклады остальных мод, отсекаемых на больших радиусах, пренебрежимо малы). Из сказанного также ясно, что пропускная способность зонда во многом зависит от эффективности трансформации основной (HE_{11} — по терминологии волоконной оптики [7]) моды подводящего оптоволокна в HE_{11} моду металлизированной оконечности зонда. Как будет показано ниже, между этими модами (несмотря на одинаковость их названий) не происходит адиабатической трансформации в плавно сужающемся волноводе-зонде (см. также [8]), а обусловленный неадиабатичностью коэффициент трансформации для обычно применяемых зондов не превышает 1–2 %.

Возможности повышения пропускной способности зондов исследовались экспериментально с применением обработки фокусированным ионным пучком [8, 9]. Эмпирическим путем были подобраны некоторые довольно сложные формы зондов (асимметричные, с тремя углами наклона), для которых коэффициент прохождения возрастал в 10– 10^3 раз. Полученные результаты объяснялись более эффективным возбуждением в зонде HE_{11} моды и уменьшением потерь в металлических стенках за счет укорочения зонда (увеличения угла сх

димости на отдельных участках), хотя соответствующие расчеты не проводились.

Теоретические работы по исследованию распространения света через зонд можно разделить на две группы. К первой относятся работы по изучению дисперсионных свойств и структуры полей мод, направляемых металлизированными диэлектрическими волноводами [10–12]. В этих работах диэлектрическое заполнение волновода считается однородным, т. е. не принимается во внимание различие диэлектрических проницаемостей сердцевины и оболочки оптоволокна в реальном зонде. Между тем, в широкой части зонда именно двуслойность оптоволокна обеспечивает его волноведущие свойства, что необходимо учитывать при анализе прохождения света через зонд.

Вторая группа работ посвящена расчету прохождения HE_{11} моды через оконечность зонда и анализу структуры ближнего поля, формируемого данной модой. Численные расчеты здесь проводились методом множественных мультиполей (multiple-multipole method) [13–15], методом FDTD [16–18] и путем интегрирования двух связанных дифференциальных уравнений для прямой и отраженной волн [19]; модельный двумерный расчет на основе теоремы Грина представлен в работе [20]. Аналитические исследования ограничивались приближением идеально проводящего металлического покрытия (см., например, [21]).

Проведенное в указанных работах рассмотрение процессов в оконечности зонда не дает полной электродинамической картины прохождения света через зонд. Для построения такой картины необходимо изучить модовый состав в различных сечениях зонда (принимая во внимание двуслойность оптоволокна) и исследовать распространение света в зонде на

всем его протяжении с учетом межмодовой трансформации и отсечки мод. Решению данной задачи и посвящена настоящая работа.

Рассмотрение ведется применительно к зондам, изготовленным методом химического травления. Распространение света в зонде рассчитывается с помощью специально разработанного кода на основе метода поперечных сечений [22]. Данный метод, хорошо зарекомендовавший себя при обсчете неоднородных СВЧ волноводов (см., например, [23, 24]), позволяет рассчитывать динамику мод (с учетом их взаимной трансформации и отсечки) на длинных участках неоднородного волновода, т. е. хорошо подходит к рассматриваемой задаче. На основе расчетов в работе предложен способ повышения пропускной способности зонда путем сравнительно несложного профилирования его оконечной части.

Дисперсионные свойства и структура полей основных мод волоконного зонда

Рассматриваемая геометрия зонда приведена на рис. 1. Внутренний конус металлического (алюминиевого) покрытия сходится под углом θ и имеет текущий радиус b . Диэлектрическая проницаемость покрытия равна ϵ_{Al} , а его толщина считается бесконечной. Данное приближение вполне оправдано, так как на практике толщина покрытия (~100 нм) существенно превыша-

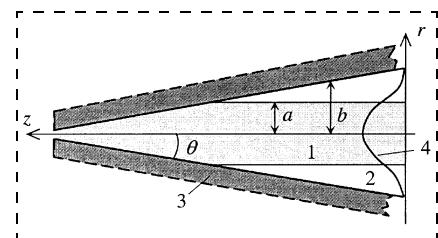


Рис. 1. Геометрия зонда:

1 — сердцевина оптоволокна; 2 — диэлектрическая оболочка оптоволокна; 3 — металлическое покрытие. К зонду подводится основная мода волоконного световода (4)

ет глубину скин-слоя для света в алюминии (~ 10 нм при длине волны $\lambda \sim 500$ нм). Диэлектрическое заполнение зонда является двуслойным в широкой части зонда — с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 при $0 < r < a$ (сердцевина волокна) и ϵ_2 при $a < r < b$ (оболочка волокна) — и однородным (ϵ_1) в оконечности зонда (при $b < a$).

Дисперсионные свойства мод металлизированного волновода с однородным диэлектрическим заполнением, что соответствует оконечности зонда, были исследованы в работах [10–12]. Волноводные свойства подводящего двуслойного оптоволокна также хорошо известны. Нашей задачей будет изучение модового состава промежуточной части зонда, где являются существенными оба фактора — металлизация поверхности и двуслойность заполнения, а также исследование перестройки дисперсионных свойств и структуры полей мод при переходе от широкой части зонда к узкой.

Процедура отыскания собственных мод слоистого (вдоль радиуса r) цилиндрического волновода стандартна (см., например, [7]) и сводится фактически к выводу и решению дисперсионного уравнения для гармонических электрического и магнитного полей:

$$\mathbf{E}, \mathbf{H} \sim \exp(i\omega t - ihz - in\phi),$$

где ω — частота моды; h — ее продольное (вдоль оси волновода z) волновое число; n — азимутальное число; ϕ — азимутальный угол. Ввиду громоздкости задачи данная процедура была реализована численно. При расчетах длина световой волны принималась равной $\lambda = 2\pi c/\omega = 488$ нм, и использовались следующие конкретные значения параметров зонда: $\theta = 10^\circ$; $a = 1,5$ мкм; $\epsilon_1 = 2,16$; $\epsilon_2 = 2,14$; $\epsilon_{Al} = -34$ (при анализе кинематики мод будем пренебрегать малой мнимой частью у ϵ_{Al}) [25]. Поскольку практический

интерес представляют моды с $n = 1$ (именно они возбуждаются в зонде основной модой оптоволокна), ограничимся рассмотрением только этих мод.

Отметим, что моды с $n \neq 0$ являются гибридными (у них отличны от нуля все z, r, ϕ — компоненты электрического и магнитного полей). Для классификации мод будем использовать общепринятые обозначения: HE_{nm} — моды, у которых поле H_z преобладает над E_z (квазИТЕ моды), EH_{nm} — моды с преобладающим продольным электрическим полем (квазИТМ моды), m — радиальный порядок моды. Как оказывается, по мере распространения в сужающемся волноводе возможно изменение типа мод (мода EH_{nm} может адабатически трансформироваться в HE_{nm} и наоборот), будем классифицировать моды по узкой части (оконечности) зонда.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента замедления $\gamma = ch/\omega$ от радиуса волновода b для четырех первых мод HE_{11} , EH_{11} , HE_{12} и EH_{12} . Наибольший интерес представляют две низшие моды HE_{11} и EH_{11} (кривые 1, 2 на рис. 2). Первая из них имеет наименьший среди всех мод критический радиус — примерно 80 нм, и, как отмечалось во введении, определяет фактически значения полей на выходной апертуре

ре зонда, а вторая, как будет показано ниже, соответствует адабатически изменяющейся при сужении волновода основной моде оптоволокна.

Рассмотрим вначале свойства моды HE_{11} . При $b > 0,4$ мкм коэффициент замедления этой моды превышает показатели преломления сердцевины и оболочки: $\gamma > \sqrt{\epsilon_1} > \sqrt{\epsilon_2}$ (см. вставку на рис. 2), так что поперечные волновые числа в сердцевине и оболочке $k_{\perp 1,2} = (\omega/c)\sqrt{\epsilon_{1,2} - \gamma^2}$ являются мнимыми и поля моды прижаты к границе металла (рис. 3, a). Иными словами, в широкой части зонда данная мода является волной поверхностного типа. На плоской границе металл—диэлектрик (в пределе бесконечно большого радиуса b) поверхностные волны, как известно, являются волнами ТМ типа ($H_z = 0$). При конечном (но большом) радиусе волновода в волне присутствуют все компоненты полей, однако H_r , H_z и E_ϕ малы по сравнению с другими компонентами и волну можно считать квазИТМ модой или модой ЕН типа. При уменьшении радиуса b коэффициент замедления данной моды уменьшается, а компоненты H_r , H_z и E_ϕ постепенно возрастают. Некоторое увеличение замедления моды в области $b \approx a$ (см. вставку на рис. 2) объясняется тем, что из-за уменьшения толщины диэлектрической оболочки спадающие к центру волновода поля поверхности волны начинают "чувствовать" влияние оптически более плотной сердцевины. При $b < 0,4$ мкм выполняется условие $\gamma < \sqrt{\epsilon_1}$, и поперечное волновое число в сердцевине $k_{\perp 1}$ (оболочки уже нет) становится действительным, а мода из поверхностной превращается в объемную. При дальнейшем уменьшении радиуса b и приближении к критиче-

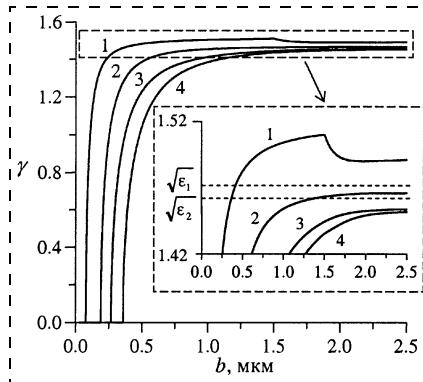


Рис. 2. Зависимость коэффициента замедления γ первых четырех ($n = 1$) мод зонда от текущего радиуса зонда b : 1 — HE_{11} ; 2 — EH_{11} ; 3 — HE_{12} ; 4 — EH_{12}

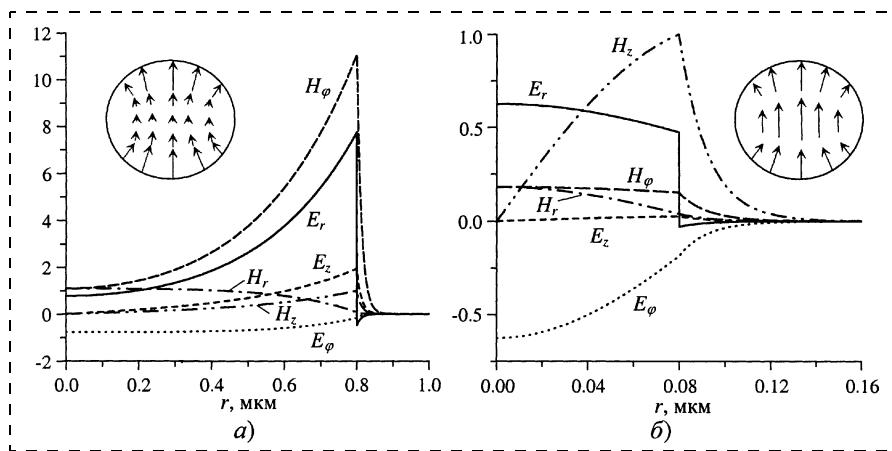


Рис. 3. Радиальные распределения полей моды HE_{11} в сечениях с двумя различными радиусами b :

а — 0,8 мкм; *б* — 80 нм. Для нормировки выбрано $H_z = 1$ на границе металла. На вставках — силовые линии электрического поля в пределах диэлектрического заполнения зонда в соответствующих сечениях (длина стрелки отображает величину поля в данной точке)

скому сечению ($b \approx 80$ нм) структура полей рассматриваемой моды становится подобной TE_{11} моде металлического волновода с идеально проводящими стенками (см. рис. 3, *б*), что и определяет классификацию этой моды как HE_{11} .

Рассмотрим теперь моду EH_{11} . В широкой части зонда коэффициент замедления этой моды лежит в интервале $\sqrt{\epsilon_2} < \gamma < \sqrt{\epsilon_1}$ (см. вставку на рис. 2), поэтому поля моды имеют объемный характер в сердцевине и монотонно спадают с увеличением радиуса

в оболочке, причем металлическое покрытие оказывает слабое влияние на распределение полей (рис. 4, *а*). Приведенная на рис. 4, *а* структура полей моды при $b = 4$ мкм практически полностью совпадает со структурой основной (HE_{11}) квазИ TE моды оптоволокна (ср. с [7]). Заметим также, что вблизи металлической поверхности поле E_r меняет знак на "хвосте" своего распределения, проходя через нуль (см. вставку на рис. 4, *а*), т. е. линии электрического поля в этом месте загибаются вдоль оси z . Данная топологическая деталь, малосу-

щественная на больших радиусах, является фактически "зародышем" ЕН (квазИ TM) характера рассматриваемой моды в узкой части зонда. С уменьшением радиуса b металлическое покрытие оказывает все большее влияние на моду. Вблизи критического сечения ($b \approx 190$ нм) структура ее полей (см. рис. 4, *б*) близка к структуре TM_{11} моды идеального металлического волновода (ср. с [26]). Таким образом, в сужающемся зонде основная мода оптоволокна адиабатически трансформируется в EH_{11} моду металлизированного волновода.

Приведенные на рис. 2 дисперсионные кривые следующих двух мод характеризуются большими радиусами отсечки и меньшими значениями коэффициента замедления; эти моды относятся к волноводному (не поверхностному) типу. В расчетах следующего раздела принимались во внимание и моды (также волноводные) более высокого порядка (всего 7 мод).

Расчет распространения света в зонде методом поперечных сечений

Для исследования процесса прохождения оптического излучения через зонд был разработан численный код на основе метода поперечных сечений. Сам метод, подробное описание которого дано в книге [22] (см. также [23, 24]), был несколько обобщен нами на случай конечной диэлектрической проницаемости металлического покрытия волновода. При расчетах учитывалось наличие мнимой части у диэлектрической проницаемости алюминия: $\epsilon_{\text{Al}} = -34,4 - i8,5$ [25]. Входные поля задавались в виде линейно поляризованной EH_{11} моды на сечении достаточно большого радиуса $b_{\max} = 3,5$ мкм, где данная мода практически совпадает с основной модой подводящего оптоволокна. Расчет проводился до сечения с $b_{\min} = 25$ нм.

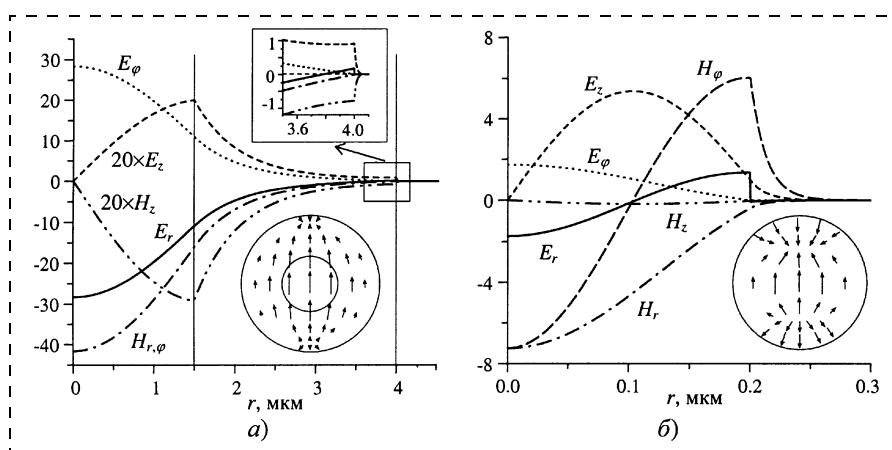


Рис. 4. Радиальные распределения полей моды EH_{11} в сечениях с двумя различными радиусами b :

а — 4 мкм; *б* — 0,2 мкм. Для нормировки выбрано $E_z = 1$ на границе сердцевины — оболочки (*а*) и на границе металла (*б*). На вставках — то же, что на рис. 3

На рис. 5 приведены мощности P первых четырех мод, распространяющихся в положительном направлении оси z (прямые волны), в зависимости от текущего радиуса зонда b . Как видно на рис. 5, в широкой части зонда (при $b > 2-2,5$ мкм) первичная мода EH_{11} распространяется практически без потерь энергии — мода направляется сердцевиной волокна и ее поля еще не "чувствуют" сужающихся металлических стенок волновода. По мере уменьшения радиуса зонда b поля моды начинают "задевать" металлическое покрытие, и ее энергия начинает убывать — отражаться в виде моды того же EH_{11} типа, трансформироваться в прямые и отраженные моды других типов ($c = 1$), а также поглощаться в металлическом покрытии. Как показал предварительный анализ, число мод, возбуждаемых за счет неоднородности (коничности) зонда, довольно велико, однако заметная ($\geq 1\%$) перекачка энергии идет лишь в ближайшие 5—7 мод, которые и учитывались при расчетах.

На радиусах $b < 1$ мкм, где первичная EH_{11} мода уже значительно ослабла, а мощности других мод заметно выросли, начинается взаимная перекачка энергии между модами — мощности мод осциллируют по мере распространения (рис. 5). При достижении модой своего критического сечения ($b \approx 350$ нм для моды EH_{12} и 270 нм для HE_{12}) она частично отражается — интенсивность отраженной волны примерно в 2 раза меньше, чем интенсивность падающей на критическое сечение (остальная часть энергии теряется за критическим сечением, где мода скинирует). Наблюдаемые на рис. 5 малые мелкомасштабные осцилляции мощности мод вблизи соответствующих этим модам критических сечений объясняются возрастанием связи прямой и отраженной волн данной моды при прибли-

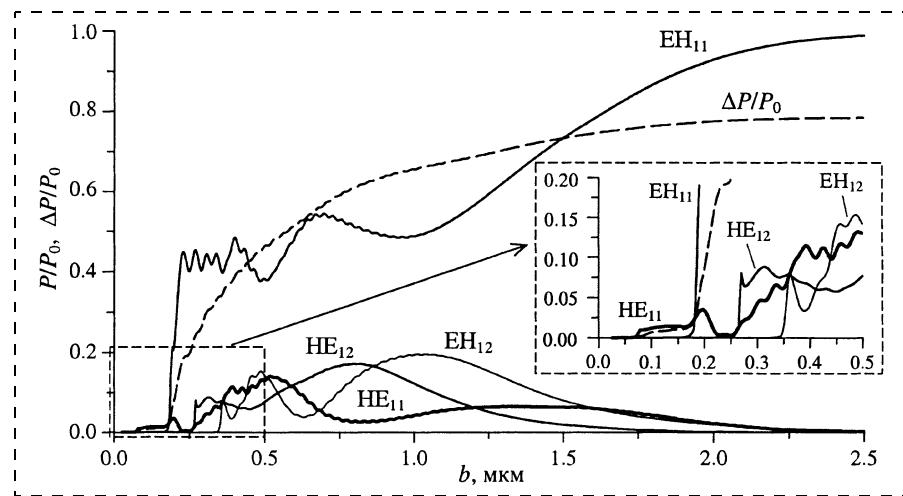


Рис. 5. Мощности P первых четырех мод, распространяющихся в прямом (вдоль оси z) направлении, и разность ΔP мощностей, переносимых через текущее сечение в прямом и обратном направлениях всеми модами, в зависимости от текущего радиуса b . Кривые нормированы на входную мощность P_0 моды EH_{11}

жении к критическому сечению (см. [22]) и сопоставимостью в этой области их локальных амплитуд по значению. При распространении отраженных волн в широкую часть зонда между ними также наблюдается межмодовая трансформация (соответствующие графики не приведены), взаимодействие же отраженных волн с прямыми является довольно слабым вдали от критических сечений.

Штриховой кривой на рис. 5 показана зависимость от текущего радиуса b величины ΔP — разности мощностей, переносимых через сечение радиуса b в прямом и обратном направлениях всеми модами. Фактически величина $\Delta P(b)$ равна мощности омических потерь в части зонда с $r < b$ (потери на излучение с выходной апертурой зонда малы). В частности, значение $\Delta P \approx 0,8 P_0$ при $b = 2,5$ мкм (см. рис. 5) дает полную мощность потерь в зонде (примерно 80 %).

Перекачка мощности из моды EH_{11} в высшие моды, обладающие большим критическим радиусом, является паразитным эффектом — эта мощность в конечном итоге поглощается или отражается назад. Для практики важна доля мощности, перешедшая из мо-

ды EH_{11} в моду HE_{11} , обладающую минимальным критическим радиусом. На рис. 5 видно, что непосредственно перед отсечкой моды EH_{11} оставшаяся в ней мощность довольно велика — около 45 % от входной мощности P_0 . Мощность же полезной моды HE_{11} в этом сечении составляет всего 1—2 % от P_0 . Тем не менее, в силу экспоненциального затухания моды EH_{11} за ее критическим сечением вклад этой моды в интенсивность света в сечениях с $b < 150$ нм пренебрежимо мал по сравнению со вкладом моды HE_{11} (рис. 6, а).

Повышение пропускной способности зонда путем профилирования его окончечной части

Для повышения коэффициента пропускания зонда необходимо увеличить перекачку энергии из моды EH_{11} в моду HE_{11} . В принципе, хорошо известна возможность повышения коэффициента межмодовой трансформации за счет создания в волноводе неоднородности, в частности, гофры на внутренней поверхности металлического волновода. В СВЧ технике, например, подобные трансформаторы мод (отрезки гофрированных волноводов) обес-

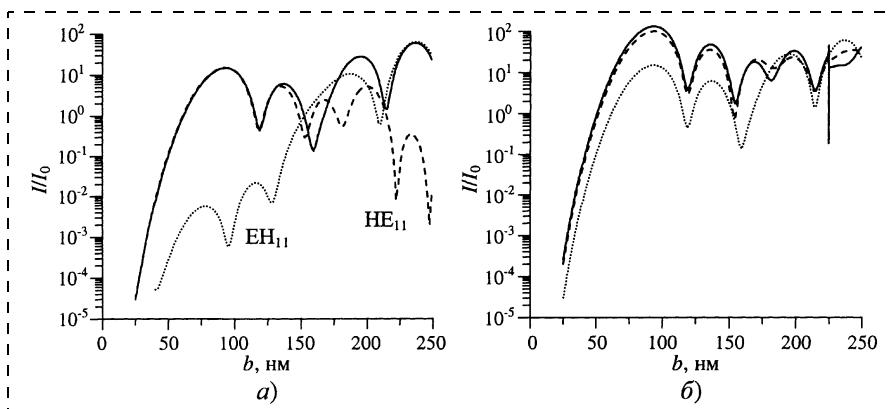


Рис. 6. Распределение интенсивности света I вдоль оси оконечной части конического (а) и профилированного (б) зондов. На рис. а приведены также распределения интенсивностей мод HE_{11} (штрих) и EH_{11} (пунктир). На рис. б сплошная линия соответствует геометрии зонда $G1$, штриховая — $G2$, пунктиром для сравнения показано распределение интенсивности в коническом зонде. Все кривые нормированы на входную интенсивность I_0 моды EH_{11}

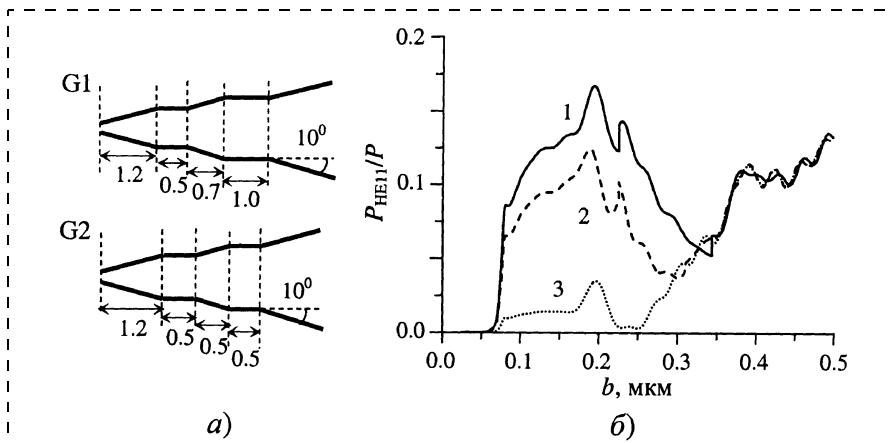


Рис. 7. Расчетные геометрии зондов $G1$ и $G2$ (а) и соответствующие зависимости от текущего радиуса b (кривые 1, 2) мощности P_{HE11} , перекачанной в моду HE_{11} (б). На рис. б приведена для сравнения мощность P_{HE11} в коническом волноводе (кривая 3). Кривые нормированы на входную мощность P_0 моды EH_{11}

печивают практически стопроцентную эффективность перекачки энергии из одной моды в другую [24]. Однако, возможности профилирования БСОМ-зонда сильно ограничены: наличие поглощения в металлическом покрытии не позволяет удлинять узкую оконечность зонда, чтобы увеличить длину взаимодействия мод; сложные профили субмикронного масштаба трудно реализовать из-за технологических ограничений.

На основе численных расчетов были подобраны два достаточно простых в изготовлении профиля оконечности зонда, обеспечивающие увеличение интенсивности

света на оси выходного сечения ($b = 25$ нм) более чем на порядок (рис. 6, б). Данные профили представляют собой последовательность нескольких чередующихся цилиндрических и конических (с одним и тем же углом схождения 10°) участков определенной длины (рис. 7, а). Как видно на рис. 7, б, повышение интенсивности света на выходе обусловлено возрастанием энергии, перекачанной в HE_{11} моду — благодаря профилированию энергия моды перед критическим сечением выросла до 10–15 % от P_0 .

Авторы признательны В. Ф. Дряхлушкину и В. Г. Павельеву за полезные обсуждения.

Список литературы

- Жданов Г. С., Либенсон М. Н., Мариновский Г. А. Оптика внутри дифракционного предела: принципы, результаты, проблемы // УФН. 1998. Т. 168. С. 801–804.
- Hecht B., Sick B., Wild U. P. et al. Scanning near-field optical microscopy with aperture probes: Fundamentals and applications // J. Chem. Phys. 2000. V. 112. P. 7761–7774.
- Valaskovic G., Holton M., and Morrison G. Parameter control, characterization, and optimization in the fabrication of optical fiber near-field probes // Appl. Opt. 1995. V. 34. P. 1215–1227.
- Lambelet P., Sayan A., Pfeffer M. et al. Chemically etched fiber tips for near-field optical microscopy: a process for smoother tips // Appl. Opt. 1998. V. 37. P. 7289–7292.
- Stöckle R., Fokas C., Deckert V. et al. High-quality near-field optical probes by tube etching // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. P. 160–162.
- Dryakhlyshin V. F., Klimov A. Yu., Rogov V. V. Probes for a scanning near-field optical microscope on the base of tapered single-mode optical fiber // Proc. SPIE (in press).
- Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1980.
- Yatsui T., Kourogi M., Ohtsu M. Highly efficient excitation of optical near-field on an apertured fiber probe with an asymmetric structure // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. P. 2257–2259.
- Yatsui T., Kourogi M., Ohtsu M. Increasing throughput of a near-field optical fiber probe over 1000 times by the use of a triple-tapered structure // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. P. 2090–2092.
- Prade B., Vinet J. Y. Guided optical waves in fibers with negative dielectric constant // J. Light-wave Technol. 1994. V. 12. P. 6–18.
- Novotny L., Hafner C. Light propagation in a cylindrical waveguide with a complex, metallic, dielectric function // Phys. Rev. E. 1994. V. 50. P. 4094–4106.
- Schroter U., Dereux A. Surface plasmon polaritons on metal cylinders with dielectric core // Phys. Rev. B. 2001. V. 64. 125420.
- Novotny L., Pohl D. W., Regli P. Light propagation through nanometer-sized structures: the two-dimensional-aperture scanning near-field optical microscope // J. Opt. Soc. Am. A. 1994. V. II. P. 1768–1779.
- Novotny L., Pohl D. W., Hecht B. Scanning near-field optical probe with ultrasmall spot size // Opt. Lett. 1995. V. 20. P. 970–972.
- Novotny L., Pohl D. W., Hecht B. Light confinement in scanning near-field optical microscopy // Ultramicroscopy. 1995. V. 61. P. 1–9.
- Chavez-Pirson A., Chu S. T. A full vector analysis of near-field luminescence probing of a single quantum dot // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 11. P. 1507–1509.
- Muler R., Lienau C. Propagation of femtosecond optical pulses through uncoated

- and metal-coated near-field fiber probes // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. P. 3367–3369.
18. **Baida F. L., Van Labeke D., Pagani Y.** Body-of-revolution FDTD simulations of improved tip performance for scanning near-field optical microscopes // Opt. Commun. 2003. V. 225. P. 241–252.
 19. **Knoll B., Keilmann F.** Electromagnetic fields in the cutoff regime of tapered metallic waveguides // Opt. Commun. 1999. V. 162. P. 177–181.
 20. **Kelso C. M., Flammer P. D., DeSanto J. A., Collins R. T.** Integral equations applied to wave propagation in two dimensions: modeling the tip of a near-field scanning optical microscope // J. Opt. Soc. Am. A. 2001. V. 18. P. 1993–2001.
 21. **Chang R., Wei P.-K., Fann W. S., Hayashi M., Lin S. H.** Theoretical investigation of near-field optical properties of tapered fiber tips and single molecule fluorescence // J. Appl. Phys. 1997. V. 81. P. 3369–3376.
 22. **Каценеленбаум Б. З.** Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
 23. **Pavel'ev V. G., Tsimring Sh. E., Zapevalov V. E.** Coupled cavities with mode conversion in gyrotrons // Int. J. Electron. 1987. V. 63. P. 379–391.
 24. **Katsenelenbaum B. Z., Mercader Del Rio L., Pereyaslavets M., Sorolla Ayza M., Thumm M. K. A.** Theory of nonuniform waveguides: the cross-section method // IEE Electromagnetic series, 44, London, 1998.
 25. **Handbook of optical constants of solids** / Ed. E. D. Palik. Academic, Orlando, 1985.
 26. **Вайнштейн Л. А.** Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 621.3.049.77.002.5

А. В. Щербаков,
ЗАО НПП "Технология, оборудование, стеклянные структуры (ТОСС)",
Л. А. Мельников, д-р физ.-мат. наук, доц.,
Саратовский университет, Саратовское отделение ИРЭ РАН

СТЕКЛОВОЛОКОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ И ФОТОНИКЕ

Представлено описание основных аспектов стекловолоконной технологии, характеристики получаемых структур, области применения изделий, созданных по этой технологии. Приводятся примеры микроструктурных световодов и микромеханических устройств.

Введение

Для создания миниатюрных чувствительных, исполнительных и энергообеспечивающих систем в микросистемной технике используются несколько базовых технологий, основанных на материаловедческой и технологической базе микро- и оптоэлектроники [1].

Одной из основных является поверхностьная (планарная) микротехнология с "жертвенным" слоем для создания объемных полосей. Современное состояние этой технологии таково, что число жертвенных слоев может быть достаточно большим для получения сложных трехмерных объек-

тов. О характеристиках этой технологии можно судить, например, по параметрам, представленным на сайте компании Microfabrica, Inc. [2]. В частности, число слоев может достигать несколько сотен, в качестве конструкционного материала могут использоваться металлы и/или диэлектрики, можно достичь достаточно большого аспектного отношения с типичным размером элементов 3–5 мкм. Тем не менее, эта технология достаточно сложна.

Технологии объемной микромеханики основаны на глубинном объемном травлении и LIGA-технологии и позволяют получить практически трехмерные струк-

туры в объеме пластины с высотой в сотни микрометров, но эти процессы либо не получили достаточного распространения, либо очень дороги (LIGA) [1].

Ранее сообщалось о разработке нового подхода к производству трехмерных структур, основанному на стекловолоконной технологии [3–6]. Ниже дано краткое описание технологии, в котором авторы постарались выделить наиболее общие аспекты. Представлены также краткие характеристики структур, получающихся по этой технологии, возможные области применения и примеры таких структур.

Описание технологии

Технологический процесс изготовления прецизионных микро- и наноструктурных элементов включает несколько этапов.

1. Изготовление необходимого числа волокон с заданными попечерным сечением, структурой и композицией на основе стекол разной химической стойкости с включением металлов, полупроводников, воздушных каналов заданной формы.

2. Сборка преформы, в которой данные элементы уложены заданным образом.

3. Нагревание и вытягивание преформы до заданных размеров, причем этапы 2 и 3 могут повторяться несколько раз. В результате образуется волокно или стекловолоконный блок со сложной поперечной структурой, образованной иерархическим упорядочением элементов, изготавляемых на этапе 1. В результате петяжки сохраняется профиль волокна, полученного на предыдущем этапе, чему способствует плотная упаковка волокон, как правило, гексагональных в сечении. Так, например, из круглых стеклянных капилляров и стержней при плотной укладке можно получить гексагональные волокна с заданным распределением воздушных отверстий. Такое волокно или блок могут быть использованы непосредственно.

4. Отрезание от волокна/блока пластин необходимой толщины, обработка поверхностей и/или объемные процессы вымывания части стекла и нанесение необходимых покрытий и контактов.

Характеристики технологии

К основным характеристикам технологического процесса изготовления микро- и наноструктурных элементов можно отнести следующие:

- простота технологических процессов. Изготовление структур принципиально не требует дорогостоящих рентгенолитографических процессов, сверхчистых материалов или работы с сильными кислотами;
- адаптивность, определяющаяся возможностью изготовления широкой номенклатуры микроизделий на одном оборудовании;
- групповой характер, так как однотипные изделия тиражируются в данном случае в составе одного волоконного пучка;
- серийность, так как одновременно можно изготавливать большое число микроизделий;
- экологическая чистота;

- большие аспектные отношения элементов структур, недостижимые в других технологиях;
- возможность получать как планарные структуры, так и реально трехмерные микро- и нанообъекты;
- возможность контроля геометрических параметров структур на всех этапах технологических процессов.

Геометрические характеристики микро- и наноструктур

При изготовлении по данной технологии микро- и наноструктурных элементов получаются следующие характеристики:

- аспектное отношение до 100;
- минимальный размер элементарной ячейки, образующей структуру, около 10 нм;
- поперечный размер до 100 мкм;
- число элементарных ячеек до 10^8 ;
- возможность получения практически любой геометрической формы в поперечном сечении, а также изготовления волокна с произвольным законом изменения размеров по длине: цилиндра, ленты, конуса, винта, бочки, что позволяет конструировать сложные микромеханизмы с большим набором функциональных возможностей;
- шероховатость поверхностей деталей и узлов составляет 10...3 нм, что дает возможность конструировать и изготавливать пары скольжения с прецизионно малыми силами трения.

По сути, получаемые по данной технологии планарные или трехмерные объекты представляют собой иерархически упорядоченные матричные образования, собранные из сравнительно простых элементов. Свойства этих матриц определяются:

- свойствами элементов, которые могут включать квантоворазмерные металлические или полупроводниковые структуры;

- свойствами упорядоченных решеток элементов, которые могут проявляться, например, в оптическом диапазоне как свойства фотонных кристаллов;
- свойствами сверхрешеток или микроструктур, проявляющихся на микроуровне илиnanoуровне как элементы микро- или наносистем.

Данные матрицы могут быть пассивными, активными или адаптивными в зависимости от включений или от их микроструктуры. Так, например, заполнение воздушных промежутков жидкокристаллическим агентом позволяет создавать фотохромные фильтры и фильтры с электронно-управляемым пропусканием. Перспективным представляется использование нанокластеров углерода для модификации материала структур или для заполнения полых элементов, так как их уникальные физические свойства могут дать различного рода полезные эффекты.

Области применений технологии

Ниже приведены перечни конечных продуктов, получаемых при использовании тех или иных изделий, созданных по стекловолоконной технологии.

Волоконные пластины:

- микроканальные пластины для электронно-оптических преобразователей;
- волоконно-оптические пластины, твисторы и фоконы;
- фильтры для биологических применений;
- оптические фильтры;
- маски для рентгенолитографии с субмикронным разрешением.

Воздушно-диэлектрические и металло-диэлектрические волокна:

- микроструктурные световоды;
- нанопроводные оптические поляризаторы;
- метаматериалы с анизотропной проводимостью.

Поликапиллярные стержни:

- рентгеновские линзы-концентраторы;
- рентгеноводы;
- оптические спектральные фильтры.

Микрокапиллярные стержни:

- микроэлектродвигатели;
- микропипетки для биологических и медицинских применений;
- микрокатоды.

Микропрофильная стеклянная лента:

- элементы дисплеев;
- электрические коннекторы с повышенной плотностью упаковки.

Примеры микроструктурных устройств, изготовленных по данной технологии

Микрокапиллярные рентгеновские линзы. Общий вид поликапиллярных линз для различных спектральных диапазонов показан на рис. 1, а, принцип действия линзы разъясняется рис. 2. Каждый из сотен тысяч капилляров играет роль волновода, передающего рентгеновское излучение, и все эти волноводы смотрят в одну точку (фокус системы). На рис. 3 показано изображение по-перечного сечения линзы, полученное с помощью электронного микроскопа. Размер фокального пятна такой линзы около 50 мкм.

Эти линзы находят применение в следующих областях:

- рентгенофлюоресцентный анализ с высоким пространственным разрешением;

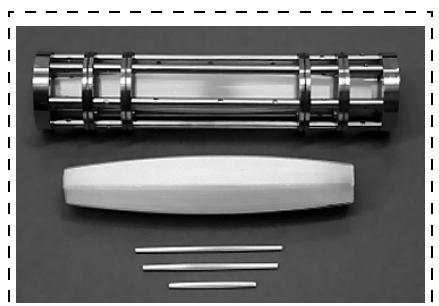


Рис. 1

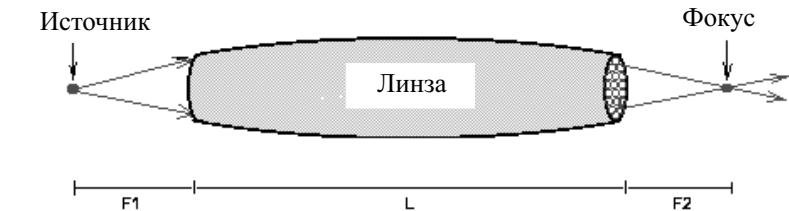


Рис. 2

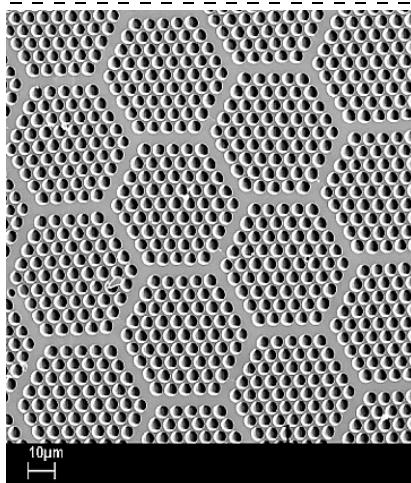


Рис. 3

- рентгеновская дифрактометрия малых образцов, порошков и тонких пленок.

Микроструктурные волокна [9, 10]. На рис. 4 показано сечение микроструктурного световода, сердцевина которого образована дефектом укладки воздушно-диэлектрической структуры, а оболочка представляет собой двумерно-периодическую структуру. Данное волокно направляет свет за счет удержания его в сердцевине, имеющей эффективный показатель преломления выше, чем эффективный показатель преломления оболочки. Это волокно обладает потерями, несколько меньшими, чем потери в стекле, образующем структуру, вследствие того, что свет частично распространяется в воздушных микрокапиллярах. Уникальное свойство микроструктурных световодов заключается в том, что вместо сердцевины может быть использован просто воздушный канал, свет в котором

удерживается вследствие наличия полосы непропускания для данной частоты в оболочке [11].

Эти волокна находят применение в следующих областях:

- в устройствах генерации оптических гармоник;
- в оптической метрологии (например, в квантовых стандартах частоты);
- в компенсаторах временной и поляризационной дисперсии для систем оптической связи;
- в волоконных лазерах с мощностью непрерывной генерации в сотни ватт;
- в волоконных лазерах сверхкоротких световых импульсов;
- в оптических волноводных фильтрах.

Микроэлектромотор [3, 5, 6]. Статор электромотора (рис. 5) образован микрокапиллярным цилиндром с заполненными металлом каналами. Последовательное переключение соответствующих пар каналов с помощью коммутатора создает вращающееся магнитное поле. Ротор двигателя образован ферритовым микроцилиндром, намагниченным вдоль диаметра и размещенным в центральном канале.

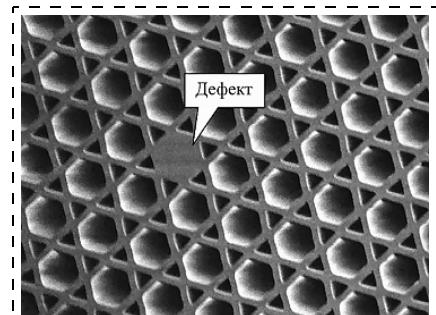


Рис. 4

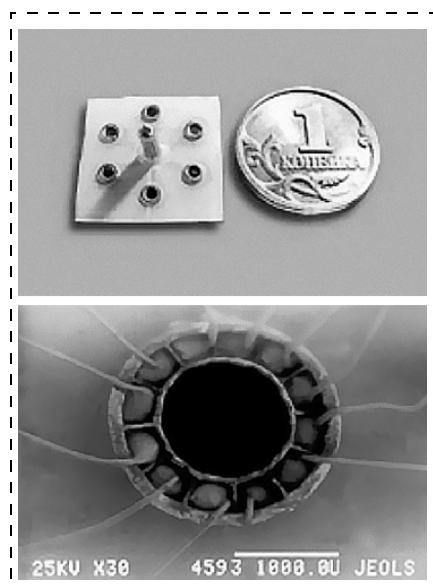


Рис. 5

Технические характеристики прототипа:

Диаметр статора, мм	0,2–2
Длина, мм	2–4
Частота вращения, мин ⁻¹	3000
Сила тока в каждой фазе, А	1
Рабочее напряжение, мВ	20–30

Микроэлектромоторы находят применение в микромеханических системах.

Микромеханические датчики. На рис. 6 схематически показан прототип акселерометра, который может быть изготовлен по

стекловолоконной технологии. Действие ускорений в направлении стрелки приводит к смещению чувствительного элемента А, закрепленного на консоли Б, которое может быть измерено по изменению расстояния от сторон элемента А до рамки В емкостными или оптическими датчиками. Такой датчик при размерах элементов от 1000–100 мкм будет иметь динамический диапазон около 30 дБ и измерять ускорения в 0,1–100 г. В рамках технологии может быть изготовлен сразу пакет датчиков, собранных так, чтобы кроме линейных ускорений (в плоскости рамки) могли бы измеряться и угловые ускорения, также в этой плоскости. По этой же технологии могут быть изготовлены и гироскопы, использующие изменение плоскости колебаний тела на упругом подвесе из-за сил Кориолиса, возникающих при вращении [12, 13].

Заключение

В ЗАО НПП "ТОСС" в течение ряда лет разрабатывается отечественная уникальная стекловолоконная технология и оборудование для массового производства микро- и наноразмерных стеклянных структур, таких как микроканальные пластины, рентгеновские поликапиллярные линзы, фотонно-кристаллические двумерные структуры и фотонно-кристаллические волокна, металло-диэлектрические структуры, субмикронные маски для рентгенологии, микромеханические устройства. К настоящему времени минимальный размер элементов получаемых структур составляет около 200 нм для воздушно-стеклянных структур и 30 нм для металло-стеклянных композиций. Проводятся поисковые работы по разработке технологии изготовления структур с размером элементов в 10–20 нм.

Таким образом, применение стекловолоконной технологии позволяет разработать технологические процессы для массового производства недорогих элементов микросистемной техники, оптики и фотоники.

Список литературы

- Лучинин В. В., Таиров Ю. М., Васильев А. А. Особенности материаловедческого и технологического базиса микросистем // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 6–9.
- [http://www.microfabrica.com/technology/EFAB works.htm](http://www.microfabrica.com/technology/EFAB%20works.htm)
- <http://www.tegs.ru>
- Ehrfeld W., Lehr H. Radial // Phys. Chem. 1995. V. 45. N 4. P. 349–365.
- Белоглазов В. И., Суховеев С. П., Суэтин Н. В. Создание микронных и субмикронных трехмерных структур с использованием стекловолоконных технологий // Микросистемная техника. 2001. № 1. С. 6–9.
- Градецкий В. Г., Андрианов Б. Е., Кнауэр Б., Степанов В. П. Исследование статических и динамических процессов в микродвигателях // Микросистемная техника. 2001. № 1. С. 13–21.
- Arkadiev V. A., Beloglasov V. I., Bzheumikoff A. A., Gorny H., Langhoff N., Margushev Z., Schmalz J., Wedell R. Polycapillary structure as X-Ray Window for differential vacuum pumping // Proceedings of SPIE. Vol. 3444-37.
- <http://www.ifg-adlershof.de>
- Fedotov A. B., Ivanov A. A., Alfimov M. V., Beloglasov V. I. et al. Tuning the Photonic Band Gap of Sub-500-nm-Pitch Holey Fibers in the 930–1030-nm Range // Laser Physics. 2000. V. 10. N 5. P. 1086.
- Alfimov M. V., Zheltikov M., Ivanov A. A., Beloglasov V. I. et al. Photonic crystal fibers with a Photonic Band Gap Tunable within the Range of 930–1030 nm // JETP Letters. 2000. V. 71. P. 489.
- Konorov S. O., Kolevatova O. A., Fedotov A. B. et al. Waveguide Modes of Electromagnetic Radiation in Hollow-Core Microstructure and Photonic-Crystal Fibers / JETP. 2003. V. 96. N 5. P. 859–869.
- Горнев Е. С., Зайцев Н. А., Равилов М. Ф., Романов И. М. и др. Обзор микрогироскопов, сформированных по технологии поверхностной или объемной микромеханики // Микросистемная техника. 2002. № 8. С. 3–6.
- Погалов А. И., Тимошенков В. П., Тимошенков С. П., Чаплыгин Ю. А. Разработка микрогироскопов на основе многослойных структур кремния и стекла // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 36–41.

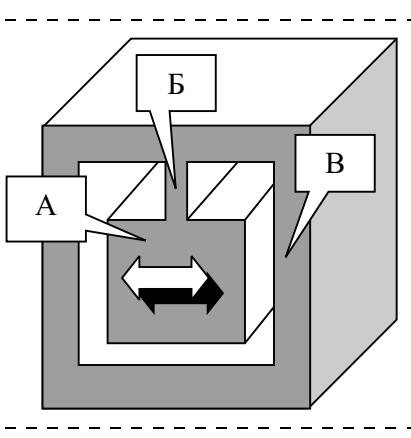


Рис. 6

УДК 621.382:537.525

А. А. Парилов, канд. техн. наук, В. В. Поддубнов,
Лаборатория ЗАО ОКБ "Гистерезис"

ПОЛУСФЕРИЧЕСКИЕ МАГНИТОТВЕРДЫЕ ПЛЕНКИ СПЛАВА Nd—Fe—В И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В МИКРОСИСТЕМАХ

Описаны полусферические магнитотвердые пленки толщиной 50–60 мкм, полученные ионно-плазменным методом распыления литой мишени сплава Nd₁₆Fe₇₆B₈. Приводятся результаты исследования распределения магнитного поля вокруг пленок плоской и неплоской конфигурации. Выдвинуто предположение о радиальной кристаллической текстуре пленок, имеющих конфигурацию тела вращения.

Первые напыленные пленки сплава Nd—Fe—В являются плоскими [1]. В настоящей работе была поставлена задача создать магнитные пленки сферической конфигурации и определить область их применения. В работе [2] уже сообщалось о возможности получения повышенной коэрцитивной силы на анизотропных пленках сплава Nd—Fe—В путем короткого отжига. Метод ионно-плазменного напыления позволяет обосновать предположение о возможности создания радиальной текстуры в пленках при их осаждении на подложки, имеющие форму тела вращения.

Методика эксперимента

Подложками для напыления служили бусинки из гематита сферической (диаметр $d = 4$ мм) и цилиндрической конфигурации. Бусинки плотно крепились к резистивному нагревателю. Мишень состава Nd₁₆Fe₇₆B₈ распылялась бомбардировкой ионами аргона со скоростью приблизительно 10 мкм/ч в течении 5 ч. Для информации о магнитных свойствах и кристаллической текстуре использовали плоские пленки-свидетели, плотно прилегающие к нагревателю и бусинкам. Начальное давление в камере составляло $1 \cdot 10^{-6}$ Па, остаточное давление аргона — $8 \cdot 10^{-4}$ Па.

Отжиг проводили нагревателем сопротивления. Камеру вакуумировали до давления $P = 8 \cdot 10^{-4}$ Па. Магнитные измерения проводили на вибромагнитометре с максимальным полем 30 кЭ (2400 кА/м). Распределение магнитного поля изучали датчиком Холла.

Результаты и их обсуждение

Согласно работе [2] аморфные пленки, напыленные при температуре подложки $T_{\text{подл}} = 360$ °C и переведенные в кристаллическое состояние коротким отжигом при температуре $T_{\text{отж}} = 540$ °C менее чем за одну минуту, приобретают следующие свойства: остаточная индукция, измеренная перпендикулярно плоскости пленки, $B_r^{\perp} = 0,93$ Тл; коэрцитивная сила, измеренная перпендикулярно плоскости пленки, $H_c^{\perp} = 1920$ кА/м (24 кЭ); магнитная энергия, измеренная перпендикулярно плоскости пленки, $(BH)_M^{\perp} = 185$ кДж/м³ (23 МГсЭ); остаточная индукция, измеренная параллельно плоскости пленки, $B_r^{\parallel} = 0,37$ Тл; коэрцитивная сила, измеренная параллельно плоскости пленки, $H_c^{\parallel} = 1390$ кА/м.

Получилициндрическая магнитная пленка, после ее снятия с гематитовой бусинки и сплющивания имела следующие свойства: $B_r^{\perp} = 0,95$ Тл, $H_c^{\perp} = 1920$ кА/м (24 кЭ), $(BH)_M^{\perp} = 220$ кДж/м³ (27,5 МГсЭ). Полусферическая магнитная пленка, подвергнутая такой же процедуре, имела следующие свойства: $B_r^{\perp} = 0,96$ Тл, $H_c^{\perp} = 1880$ кА/м (23,5 кЭ), $(BH)_M^{\perp} = 220$ кДж/м³ (27,5 МГсЭ).

С помощью датчика Холла определяли магнитное поле вокруг пленок различной конфигурации. На рис. 1 представлено распределение магнитного поля пленки со следующими свойствами: масса 7,3 мг, намагниченность насыщения $I_s^{\perp} = 7,5$ кГс,

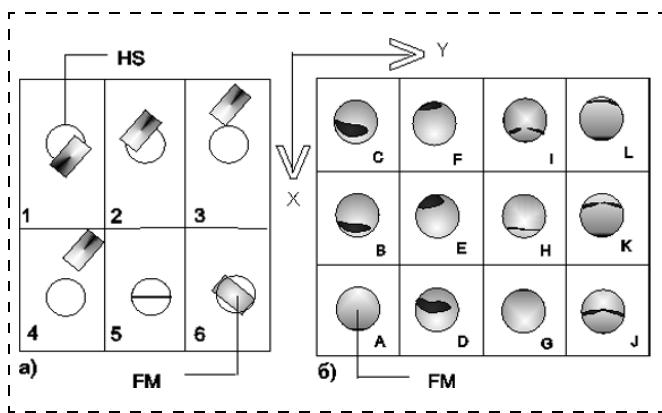


Рис. 1. Позиция расположения пленочного магнита:
а — анизотропного; б — сферического

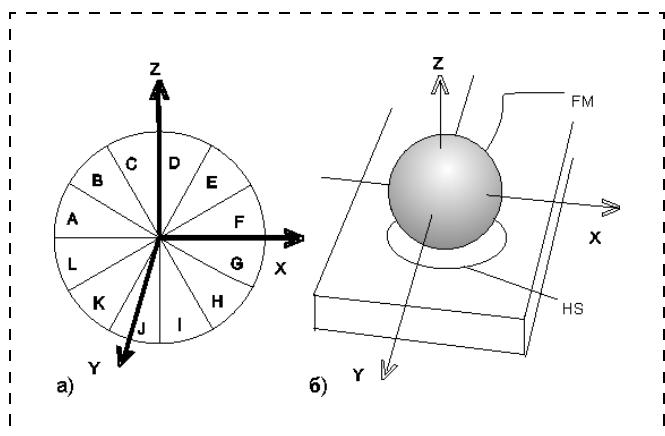


Рис. 2. Последовательность позиций и их расположение относительно трехосной системы XYZ (а); расположение осей X, Y и Z относительно датчика Холла (б)

$I_s^{II} = 6,0$ кГс, остаточная намагниченность $I_r^\perp = 6,7$ кГс, $I_r^{II} = 4,3$ кГс, $H_c^\perp = 23,5$ кЭ, $H_c^{II} = 21,6$ кЭ. Кружки — расположение датчика Холла, маркированные прямоугольники — магнитная пленка. Метка на прямоугольнике позволяет судить о повороте магнитной пленки на 180°: 1 — 72 Э; 2 — 120 Э; 3 — 8 Э; 4 — 4 Э; 5 — 116 Э; 6 — 156 Э.

Сферический пленочный магнит — "магнитная бусинка", зафиксированная в направлении оси Y , поворачивалась на угол 30° для изменения позиции. Центр бусинки находился в одной позиции при всех измерениях. Получили специфическое распределение магнитного поля "магнитной бусинки": $A = 0$ Э; $B = 28$ Э (Ю); $C = 68$ Э (Ю); $D = 12$ Э (Ю); $E = 4$ Э (Ю); $F = 0$ (Ю); $G = 4$ Э (С); $H = 8$ Э (С); $I = 12$ Э (С); $J = 52$ Э (С); $K = 72$ Э (С); $L = 40$ Э (С), где Ю — южный полюс, С — северный полюс (рис. 1, б). Две неодинаковые черные метки на рис. 1, б — это две небольшие области отсутствия покрытия магнитной пленкой. Одна метка наблюдается в позициях $B—F$, другая — в позициях $H—L$. Подробное представление о расположении "магнитной бусинки" при измерениях можно получить рассматривая рис. 2.

Видно, что напряженность магнитного поля на поверхности может достигать 156 Э. Сложение четырех пленок "одна на другой" приводит к возрастанию напряженности магнитного поля на поверхности верхней пленки до 400 Э. Таким образом, напряженность поля вокруг пленок достаточна для их практического использования и может быть увеличена за счет утолщения пленки.

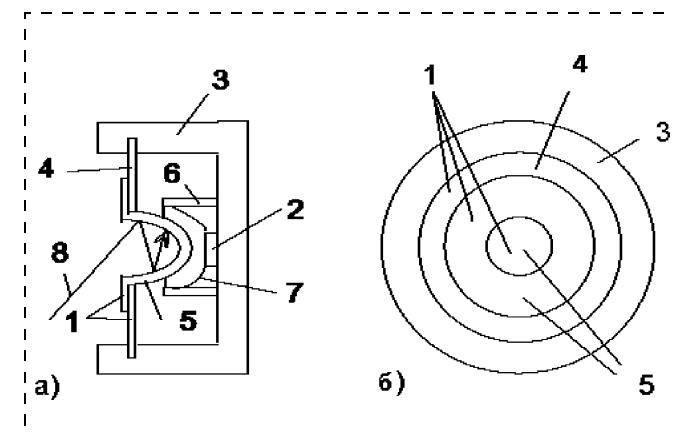


Рис. 3. Вид микросистемы:
а — в профиль; б — фронтальный

Магнитотвердые пленки могут быть использованы в пленочных микромагнитных системах. Вариации пленок, получаемых нанесением на различные по конфигурации подложки, помогут в конструировании новых приборов. Магнитотвердые пленки на основе соединения Nd₂Fe₁₄B могут быть использованы в комбинации с другими материалами.

Предлагаемое устройство возможного применения полусферической пленки относится к электротехнике, в частности, к электроакустическим преобразователям звуковых колебаний в электрические и может быть использовано в микросистемах. Конструкция этого прибора показана на рис. 3.

Предлагаемая микросистема содержит звуко-приемный элемент 1 и преобразователь 2 колебаний звукоприемного элемента в электрический сигнал, отличающийся тем, что звуко-приемный элемент 1, закрепленный держателем 3, представляет собой мемброну 4 с закрепленной на ней полусферической магнитотвердой пленкой 5, а преобразователь 2 колебаний звукоприемного элемента в электрический сигнал установлен неподвижно с возможностью взаимодействия с магнитным полем от магнитотвердой пленки. Преобразователь содержит катушку 6 из токонесущих проводов 7. Воздействие атомов газа на звуко-приемный элемент 1 обозначено ярлыком 8. Предположено, что полусферическая конфигурация пленки повышает звуковосприимчивость прибора.

Список литературы

1. Cadieu F. J., Cheung T. D., Wicramasekara L. Magnetic properties of sputtered Nd—Fe—B films // JMMM. 1986. 54—57. P. 535—536.
2. Lileev A. S., Parilov A. A., Blatov V. G. Influence of technological parameters on properties of hard magnetic Nd—Fe—B alloy films // JMMM. 2002. 242—245. P. 1300—1303.

Конструирование и моделирование МСТ

УДК 621.3.049.76

В. П. Драгунов, канд. физ.-мат. наук,
Новосибирский государственный технический
университет

НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Получены аналитические выражения, позволяющие моделировать поведение упругих элементов МЭМС в нелинейном приближении.

Введение

Развитие микро- и наноэлектронных технологий в сочетании с технологиями объемной и поверхностной микрообработки кремния открыло принципиально новые возможности по функциональной и схемной интеграции и способствовало появлению микроэлектромеханических систем (МЭМС). При разработке МЭМС возникает необходимость в оценке влияния электростатических полей на поведение их упругого элемента (УЭ). В [1] рассмотрено поведение торсионных УЭ круглой, прямоугольной и треугольной формы при воздействии электрических полей. Поведение УЭ диафрагменного типа круглой, квадратной, треугольной и шестиугольной формы в приближении малых прогибов (линейное приближение) при одновременном воздействии электрического поля и внешнего давления проанализировано в [2]. В настоящей статье поведение УЭ МЭМС разной формы при одновременном воздействии электрического поля и однородного внешнего давления рассматривается в нелинейном приближении.

Постановка задачи

При приложении электрического напряжения между УЭ МЭМС (диафрагмой) и неподвижным электродом (рис. 1) УЭ прогибается, что и используется для совершения полезной работы. Во многих случаях прогиб УЭ $W(x, y)$ может быть порядка толщины диафрагмы h . Линейное же приближение теории изгиба тонких пластин, обычно используемое для определения прогибов и полей деформаций в УЭ МЭМС, справедливо лишь в области малых прогибов (максимальный прогиб не должен превышать одной-двух десятых толщины диафрагмы). При больших прогибах усилия в срединной

поверхности диафрагмы могут стать сравнимыми с максимальными изгибными напряжениями, и для их учета кроме нормального перемещения $W(x, y)$ точек, лежащих в срединной поверхности, необходимо учесть проекции $U(x, y)$ и $G(x, y)$ перемещения этих точек на оси, лежащие в этой поверхности. Для упрощения расчетов все же предполагают, что эти проекции малы по сравнению с $W(x, y)$. Это, конечно, ограничивает величину прогибов, для которых справедливо данное приближение. Однако, в отличие от линейного, оно справедливо при прогибах, сопоставимых с толщиной диафрагмы.

Предположим, что диафрагма представляет собой плоскую пластинку, толщина которой h много меньше ее латеральных размеров. В этом случае с учетом усилий, возникающих в срединной поверхности, система уравнений, описывающих деформированное состояние гибкой пластины, может быть представлена в виде:

$$LW(x, y) = q + Q(x, y); \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial x} = 0. \quad (2)$$

Для изотропного случая:

$$L = D \left(\frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right);$$

$$Q(x, y) = N_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} W(x, y) + 2T \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} W(x, y) + N_y \frac{\partial^2}{\partial y^2} W(x, y);$$

$$N_x = \frac{12}{h^2} D \left\{ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + v \left[\frac{\partial G}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right] \right\};$$

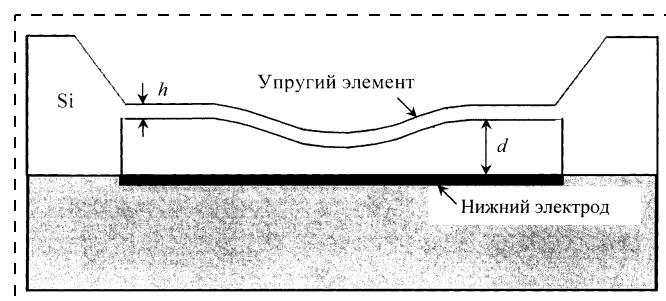


Рис. 1. Микромеханическая система с электростатическим управлением

$$N_y = \frac{12}{h^2} D \left\{ \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 + v \left[\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \right] \right\};$$

$$T = \frac{12}{h^2} D \frac{(1-v)}{2} \left\{ \frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial W}{\partial y} \right\};$$

$$D = \frac{h^3}{12} \frac{E}{1-v^2},$$

где q — интенсивность поперечной нагрузки; E — модуль упругости материала УЭ; v — коэффициент Пуассона.

Решение системы (1), (2) будем искать методом Бубнова—Галеркина. В этом случае уравнение, определяющее прогиб пластиинки $W(x, y)$, имеет вид

$$\iint_{\Gamma} [LW(x, y) - q - Q(x, y)] \delta W(x, y) dx dy = 0, \quad (3)$$

где $\delta W(x, y)$ — вариация прогиба; Γ — граница контура пластиинки.

Если прогибы $W(x, y)$ и перемещения в срединной поверхности $U(x, y)$ и $G(x, y)$ искать в виде

$$W(x, y) = W_0 \phi_w(x, y); \quad (4)$$

$$U(x, y) = W_0^2 \phi_u(x, y); \quad G(x, y) = W_0^2 \phi_g(x, y), \quad (5)$$

где W_0 — прогиб в точке, соответствующей центру тяжести пластиинки; $\phi_k(x, y)$ — функции, определяемые граничными условиями и симметрией задачи, то интегрируя (3), получим уравнение, связывающее прогиб W_0 и внешнее воздействие q , в виде

$$A_3 W_0^3 + A_1 W_0 - F(q, W_0) = 0, \quad (6)$$

где

$$A_3 = - \iint_{\Gamma} Q(x, y) \phi_w(x, y) dx dy;$$

$$A_1 = \iint_{\Gamma} \phi_w(x, y) L \phi_w(x, y) dx dy;$$

$$F(q, W_0) = \iint_{\Gamma} q(x, y, W_0) \phi_w(x, y) dx dy.$$

Решения (6) определяются конструктивными особенностями конкретной МЭМС и видом внешнего воздействия. В данной статье ограничимся рассмотрением УЭ с большим отношением их латеральных размеров к расстоянию между электродами. Тогда при оценке распределения напряженности электрического поля под диафрагмой можно не учитывать искривление силовых линий, а также пренебречь краевыми эффектами.

Результаты расчетов и обсуждение

Электромеханическая система с параллельными электродами. Рассмотрим основные особенности поведения диафрагмы УЭ на примере простейшей электромеханической системы (рис. 2). Будем полагать, что на электроды действуют сила упругости пружины (возвращающая сила), электростатическая сила и постоянная сила F_0 (например, сила тяжести), не зависящая от смещения подвижного электрода z . В этом случае уравнение равновесия (аналог (6)) принимает вид

$$F_{\text{уп}} + F_{\text{эл}} + F_0 = -\lambda z^3 - kz + \frac{\epsilon_0 \varepsilon S}{2} \left(\frac{V}{d-z} \right)^2 + F_0 = 0,$$

где k — коэффициент квазиупругой силы пружины; λ — коэффициент, характеризующий нелинейность возвращающей силы; ϵ_0 — электрическая постоянная; ε — относительная диэлектрическая проницаемость; S — площадь электрода; V — приложенное напряжение. В безразмерных переменных уравнение равновесия можно представить в следующей форме:

$$A_3 Wd^3 + Wd - SV/(1-Wd)^2 - SP = 0, \quad (7)$$

где $Wd = z/d$; $A_3 = \lambda d^2/k$; $SP = F_0/(kd)$; $SV = \epsilon_0 \varepsilon SV^2/(2kd^3)$.

Анализ (7) показывает, что и при учете нелинейности возвращающей силы пружины будет наблюдаться явление склонивания (pull in instability), которое можно характеризовать значениями критического смещения Wd_{kp} (pull in displacement) и критического напряжения SV_{kp} (pull in voltage). Однако, в отличие от линейного приближения, в данном случае значения этих параметров будут зависеть от A_3 (т. е. от соотношения между λ и k) и изменяться от значений, определяемых выражениями

$$Wd_{\text{kp1}} = (1 + 2SP)/3; \quad SV_{\text{kp}} = 0,5(1 - Wd_{\text{kp1}})^3, \quad (8)$$

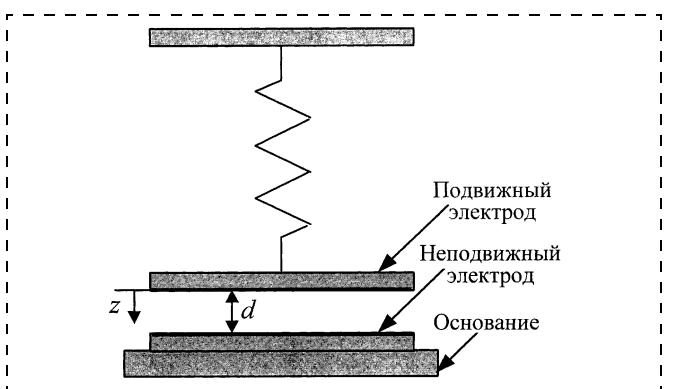


Рис. 2. Электромеханическая система с параллельными электродами

если в (7) можно пренебречь первым слагаемым (линейное приближение для $F_{\text{уп}}$), до значений, определяемых выражениями

$$Wd_{\text{кр3}}^3 - 0,6 W_{\text{кр3}}^2 = 0,4SP/A_3;$$

$$SV_{\text{кр}} = 1,5A_3 Wd_{\text{кр3}}^2 (1 - Wd_{\text{кр3}})^3, \quad (9)$$

если в (7) можно пренебречь вторым слагаемым (чисто нелинейное приближение для $F_{\text{уп}}$).

Согласно (8) и (9), при отсутствии постоянной силы ($SP = 0$) в чисто линейном приближении $Wd_{\text{кр1}} = 1/3$, а в нелинейном — $Wd_{\text{кр3}} = 3/5$. Таким образом, в нелинейном случае при $SP = 0$ область управляемого смещения подвижного электрода увеличится в 1,8 раза. Можно показать, что если первый член в уравнении (7) имеет вид $A_n Wd^n$, то критическое смещение при отсутствии силы F_0 будет определяться выражением $Wd_{\text{кр}n} = n/(n + 2)$.

Зависимости критического смещения $Wd_{\text{кр}}$ от величины A_3 , рассчитанные с использованием (7), показаны на рис. 3. Данные кривые отражают характерные особенности поведения УЭ МЭМС при изменении относительного коэффициента нелинейности. При малых A_3 вклад первого слагаемого (т. е. нелинейности $F_{\text{уп}}$) в (7) мал и значения $Wd_{\text{кр}}$ при различных SP определяются выражениями (8). По мере увеличения A_3 возвращающая сила быстро возрастает, начальное смещение под действием силы F_0 уменьшается. В результате найденные значения $Wd_{\text{кр}}$ будут все больше приближаться к значению $Wd_{\text{кр}} = 0,6$, соответствующему случаю с $SP = 0$. Например, в чисто нелинейном приближении из первого уравнения (9) следует, что по мере увеличения A_3 правая часть уравнения стремится к нулю, т. е. роль SP уменьшается.

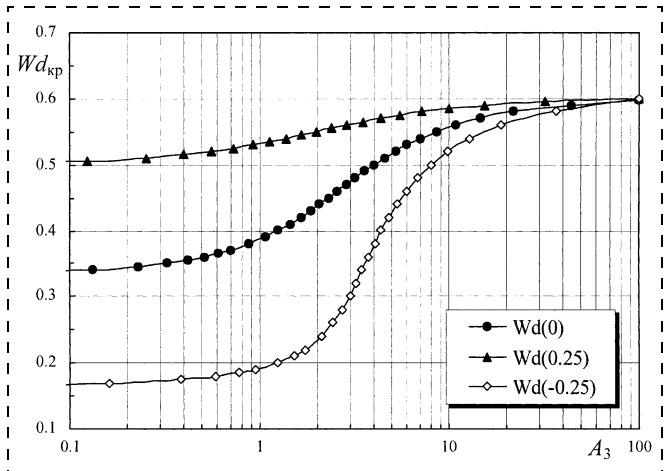


Рис. 3. Зависимости критического смещения $Wd_{\text{кр}}$ подвижного электрода от относительного коэффициента нелинейности A_3 при $SP = 0$ — $Wd(0)$; $SP = -0,25$ — $Wd(-0,25)$; $SP = 0,25$ — $Wd(0,25)$ электромеханической системы с параллельными электродами

Еще одна особенность, связанная с нелинейной зависимостью возвращающей силы, проявится на зависимости относительного смещения подвижного электрода Wd от электрического поля (рис. 4). Видно, что для отрицательных SP (когда сила F_0 раздвигает электроды) могут существовать две критические точки. В результате при увеличении управляющего напряжения SV смещение Wd подвижного электрода будет сначала монотонно уменьшаться (кривая 3, рис. 4), пока не достигнет первой критической точки (точка "a"), затем смещение скачком изменится до значения, соответствующего точке "б", затем продолжит монотонно изменяться до второй критической точки. Если же, не достигнув второй критической точки, начать уменьшать SV , то обратный скачок произойдет при значениях Wd и SV , не совпадающих с координатами точки "б", т. е. будет наблюдаться своеобразный гистерезис. Такое поведение системы связано с тем, что при отрицательных Wd возвращающая и электростатическая силы направлены в одну сторону (к неподвижному электроду) и обе стремятся вернуть систему в нейтральное положение, из которого она была выведена силой F_0 ($SP < 0$). При переходе из точки "a" в точку "б" электростатическая сила монотонно возрастает (не меняя направления), а возвращающая сила при $Wd > 0$ изменяет направление и быстро (нелинейно) возрастает, но теперь уже действуя против электростатической силы, как и F_0 . В результате в точке "б" достигается равновесие.

Наличие линейной компоненты у возвращающей силы уменьшает данный эффект. Поэтому особенности, присущие конкретной системе, могут быть связаны с формой УЭ и электродов, с зависимостью прогиба от координаты, с жесткостью системы и ее конструктивными особенностями.

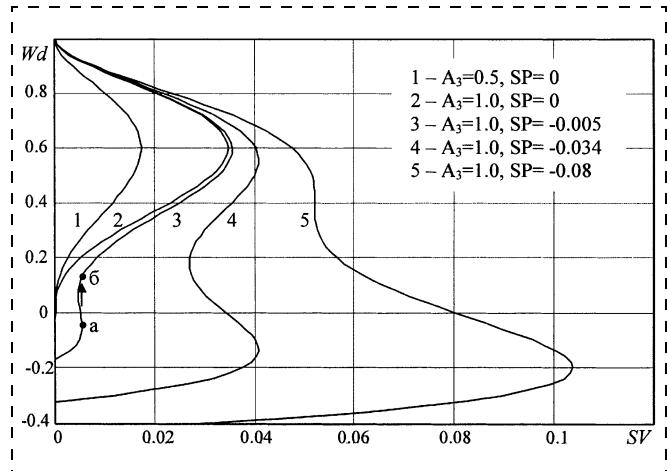


Рис. 4. Зависимости нормированного смещения подвижного электрода Wd для электромеханической системы с параллельными электродами от приведенного электрического напряжения SV

УЭ с прямоугольной диафрагмой, закрепленной по двум сторонам. Рассмотрим изгиб УЭ в виде прямоугольной пластины, жестко защемленной по двум длинным противоположным сторонам, возникающий под действием электрического поля и равномерно распределенного внешнего давления P . Пусть длина пластинки вдоль оси x равна $2a$, а вдоль оси y — b , причем $b \gg 2a$. В этом случае на некотором удалении от коротких кромок под действием поперечной нагрузки срединная поверхность пластины принимает форму, близкую к цилиндрической, а прогибы $W(x)$, напряжения и деформации будут зависеть только от одной координаты x . В качестве пробной функции для прогиба будем использовать функцию

$$W(X) = W_0(1 - X^2)^2, \quad (10)$$

соответствующую точному решению (1) в линейном приближении при $P \neq 0$ и $V = 0$ (здесь $X = x/a$). Интегрируя (2) с учетом (10) и граничных условий, получим, что

$$U(X) = W_0^2 \frac{8}{105a} (1 - X^2)(15X^4 - 27X^2 + 8)X. \quad (11)$$

При этом уравнение (6) принимает вид

$$142,66 dh^2 Wd^3 + 204,8 Wd - F(Wd) SV - 0,5333 SP = 0, \quad (12)$$

где $dh = d/h$; $Wd = W_0/d$; $SP = (2a)^4 P/(Dd)$; $SV = 0,5\epsilon_0\epsilon(2a)^4 V^2/(Dd^3)$;

$$F(Wd) = \frac{(2Wd + \sqrt{Wd} - 1)F_1(Wd) + 2\sqrt{Wd} + (2Wd - \sqrt{Wd} - 1)F_2(Wd)}{8Wd(1 - Wd)\sqrt{Wd}},$$

$$F_1(Wd) = \sqrt{\frac{\sqrt{Wd}}{1 - \sqrt{Wd}}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{\sqrt{Wd}}{1 - \sqrt{Wd}}} \right);$$

$$F_2(Wd) = \sqrt{\frac{\sqrt{Wd}}{1 + \sqrt{Wd}}} \operatorname{arth} \left(\sqrt{\frac{\sqrt{Wd}}{1 + \sqrt{Wd}}} \right).$$

Согласно (12), роль нелинейности возвращающей силы возрастает при увеличении отношения начального зазора d к толщине пластины h . Причем зависимость критического прогиба Wd_{kp} от отношения dh имеет вид

$$\frac{273,1 + 1,075 SP - c_4 Wd_{kp}^4 - c_3 Wd_{kp}^3 + c_2 Wd_{kp}^2 + c_1 Wd_{kp}}{Wd_{kp}^2 (Wd_{kp}^5 - Wd_{kp}^4 + 3,6 Wd_{kp}^3 - 15 Wd_{kp}^2 + 17,34 Wd_{kp} - 5,87)} = 95,8 dh^2; \quad (13)$$

$$c_4 = 139,5 + 0,18SP; \quad c_3 = 110 - 0,726SP;$$

$$c_2 = 1056 - 0,224SP; \quad c_1 = 1081 + 1,394SP.$$

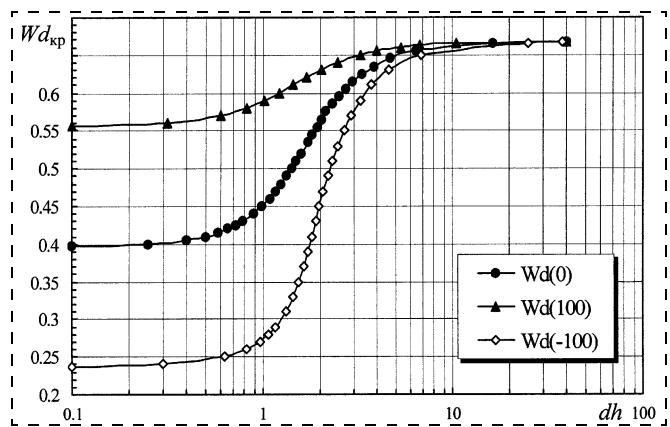


Рис. 5. Зависимости критического прогиба Wd_{kp} от отношения dh для прямоугольной диафрагмы, закрепленной по двум сторонам, при $SP = 0$ — $Wd(0)$; $SP = -100$ — $Wd(-100)$ и $SP = 100$ — $Wd(100)$

На рис. 5 приведены зависимости величины Wd_{kp} от dh , рассчитанные с использованием (13). Качественно эти зависимости соответствуют кривым, приведенным на рис. 3. Количественные отличия связаны с появившейся зависимостью прогиба диафрагмы от координаты, вызванной защемлением двух ее сторон. Оценки показывают, что при отсутствии внешнего давления ($P = 0$), если пренебречь в (12) первым слагаемым (линейное приближение), получим, что $Wd_{kp} \approx 0,397$, а если пренебречь вторым слагаемым (чисто нелинейное приближение), получим, что $Wd_{kp} \approx 0,667$.

Зависимости относительного прогиба Wd УЭ при $dh = 1$ от приведенного электрического поля для нескольких значений внешнего давления приведены на рис. 6. На этом же рисунке представлены соответствующие кривые, рассчитанные в линейном приближении (светлые маркеры). Видно,

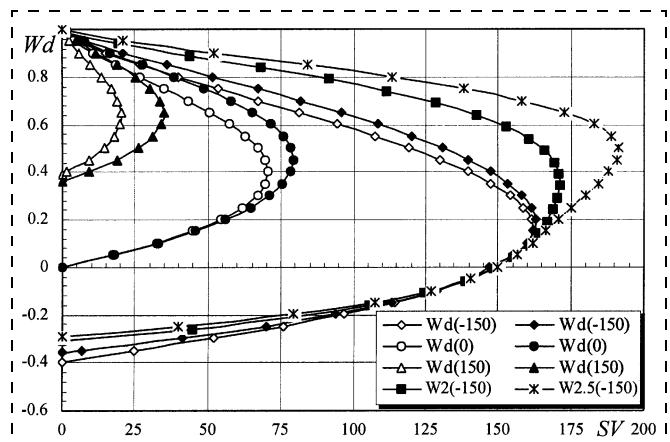


Рис. 6. Зависимости нормированного прогиба для прямоугольной диафрагмы, закрепленной по двум сторонам, от приведенного электрического напряжения для $SP = 0, -150, 150$ и $dh = 1$ — $Wd(0)$, $Wd(-150)$, $Wd(150)$; $dh = 2$ — $W2(-150)$ и $dh = 2,5$ — $W2,5(-150)$. Светлые маркеры — расчет в линейном приближении, темные — в нелинейном

что учет нелинейности возвращающей силы изменяет и критический прогиб, и критическое напряжение. Причем эти изменения возрастают при удалении критической точки от нейтрального положения, когда $Wd = 0$. Отсутствие на приведенных зависимостях второй критической точки связано с относительно малым вкладом нелинейности при $dh = 1$. Анализ показывает, что увеличение dh и "отталкивающего" давления приводит к появлению второй критической точки подобно тому, как показано на рис. 4. Следует, однако, заметить, что в рассматриваемом приближении максимальные прогибы УЭ ограничены величиной h . Таким образом, оценки, выполненные при больших значениях dh , когда это ограничение уже не выполняется, носят скорее характер прогноза.

УЭ с диафрагмой, закрепленной по периметру. Рассмотрим влияние электрического поля V и однородного внешнего давления P на прогиб плоских диафрагм, имеющих форму круга или правильного многоугольника, жестко защемленных по периметру. В качестве пробных для $W(x, y)$, $U(x, y)$ и $G(x, y)$ будем использовать функции, приведенные в [3]. При этом выражение (6) представится в виде

$$0,75\lambda_0 dh^2 Wd^3 + Wd - F_0(Wd)SV - 1,583 \cdot 10^{-3}SP = 0 \quad (14)$$

— для круглой диафрагмы;

$$0,3065\lambda_3 dh^2 Wd^3 + Wd - F_3(Wd)SV - 8,573 \cdot 10^{-4}SP = 0 \quad (15)$$

— для диафрагмы в форме правильного треугольника;

$$0,897\lambda_4 dh^2 Wd^3 + Wd - F_4(Wd)SV - 1,392 \cdot 10^{-3}SP = 0 \quad (16)$$

— для квадратной диафрагмы;

$$0,259\lambda_6 dh^2 Wd^3 + Wd - F_6(Wd)SV - 1,29 \cdot 10^{-3}SP = 0 \quad (17)$$

— для диафрагмы в форме правильного шестиугольника.

Здесь $SP = S^2P/(Dd)$; $SV = 0,5\varepsilon_0\varepsilon S^2V^2/(Dd^3)$; S — площадь диафрагмы;

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 0,7 + 0,4v - 0,3v^2; \\ \lambda_3 &= 1,128 + 0,75v - 0,226v^2; \\ \lambda_4 &= 0,4864 + 0,2961v - 0,1654v^2; \\ \lambda_6 &= 1,8316 + 0,855v - 0,856v^2; \end{aligned}$$

$$F_0(Wd) = [\sqrt{Wd} - (1 - Wd)\operatorname{arth}(\sqrt{Wd})]/[421,1Wd\sqrt{Wd}(1 - Wd)];$$

$$\begin{aligned} F_3(Wd) &= \frac{0,000844}{1 - 1,22Wd + 0,219Wd^2}; \\ F_4(Wd) &= \frac{0,001307}{1 - 1,2178Wd + 0,2178Wd^2}; \\ F_6(Wd) &= \frac{0,45Wd^3 + 0,13Wd^2 + 2,02Wd + 1,795}{1390(1 - Wd^2)}. \end{aligned}$$

Согласно (14)–(17) при учете напряжений, возникающих в срединной поверхности диафрагмы, критический прогиб и критическое напряжение зависят от отношения dh начального зазора между электродами d и толщины диафрагмы h . Учитывая, что в критической точке $\partial V/\partial W = 0$, можно получить выражения, определяющие зависимость Wd_{kp} от отношения dh . Анализ показывает, что для круглой диафрагмы

$$\begin{aligned} \frac{(448Wd_{kp} - 0,507SP)\sqrt{Wd_{kp}}Wd_{kp} - (320Wd_{kp} - 0,304SP)\vartheta(Wd_{kp})}{432\lambda_0Wd_{kp}^3[\vartheta(Wd_{kp}) - 1,222\sqrt{Wd_{kp}}Wd_{kp}]} &= \\ &= dh^2; \end{aligned} \quad (18)$$

для диафрагмы в форме правильного треугольника

$$\begin{aligned} \frac{121,6Wd_{kp}^2 - 451,7Wd_{kp} - 0,0695Wd_{kp}SP + 0,1936SP + 185,1}{62,14\lambda_3Wd_{kp}^2(4,457Wd_{kp} - Wd_{kp}^2 - 2,74)} &= \\ &= dh^2; \end{aligned} \quad (19)$$

для квадратной диафрагмы

$$\begin{aligned} \frac{1128,5Wd_{kp}^2 - 4206,5Wd_{kp} - Wd_{kp}SP + 2,796SP + 1727,1}{1687,5\lambda_4Wd_{kp}^2(4,473Wd_{kp} - Wd_{kp}^2 - 2,755)} &= \\ &= dh^2, \end{aligned} \quad (20)$$

а для диафрагмы в форме правильного шестиугольника

$$\begin{aligned} \frac{\vartheta_1(Wd_{kp})Wd_{kp}^2 + \vartheta_2(Wd_{kp})Wd_{kp}SP - 2,015SP - 1386}{180\lambda_6Wd_{kp}^2(\vartheta_3(Wd_{kp})Wd_{kp} + 5,98)} &= \\ &= dh^2. \end{aligned} \quad (21)$$

Здесь $\vartheta(Wd_{kp}) = \sqrt{Wd_{kp}} - (1 - Wd_{kp})^2 \times \operatorname{arth}(\sqrt{Wd_{kp}})$;

$$\begin{aligned} \vartheta_1(Wd_{kp}) &= 100,4Wd_{kp}^2 + 3815Wd_{kp} + 4260; \\ \vartheta_2(Wd_{kp}) &= 0,449Wd_{kp}^3 - 3,361Wd_{kp} - 3,84; \\ \vartheta_3(Wd_{kp}) &= 4,49 - 9,83Wd_{kp}^2 - 8,98Wd_{kp}^2 - \\ &\quad - 0,433Wd_{kp}^3 - Wd_{kp}^4. \end{aligned}$$

На рис. 7 и 8 приведены зависимости величины Wd_{kp} от dh , рассчитанные с использованием (18)–(21). Качественно эти зависимости соответствуют кривым, приведенным на рис. 3 и 5. Однако появившаяся зависимость прогиба диафрагмы и от ко-

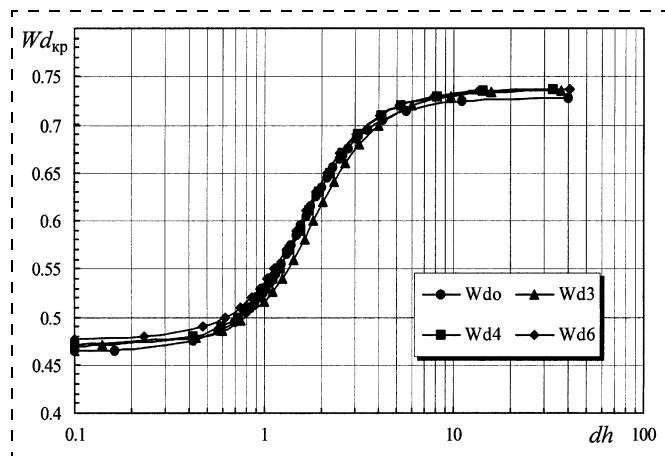


Рис. 7. Зависимости критического прогиба Wd_{kp} для круглой (Wd_0), треугольной ($Wd3$), квадратной ($Wd4$) и шестиугольной ($Wd6$) диафрагмы от отношения dh при $SP = 0$

ординаты y , вызванная защемлением по всему периметру, привела к смещению кривых в область больших Wd_{kp} . Оценки показывают, что при отсутствии внешнего давления ($P = 0$), если пренебречь в (14)–(17) первыми слагаемыми (линейное приближение), получим, что $Wd_{kp} \approx 0,47$, а если пренебречь вторыми слагаемыми (чисто нелинейное приближение), получим, что $Wd_{kp} \approx 0,73$. Таким образом, защемление по периметру привело к дополнительному увеличению Wd_{kp} .

Заключение

Получены аналитические выражения, позволяющие моделировать влияние электрического поля и однородного внешнего давления на характеристики УЭ МЭМС. Установлено, что в отсутствие внешнего давления величина Wd_{kp} определяется

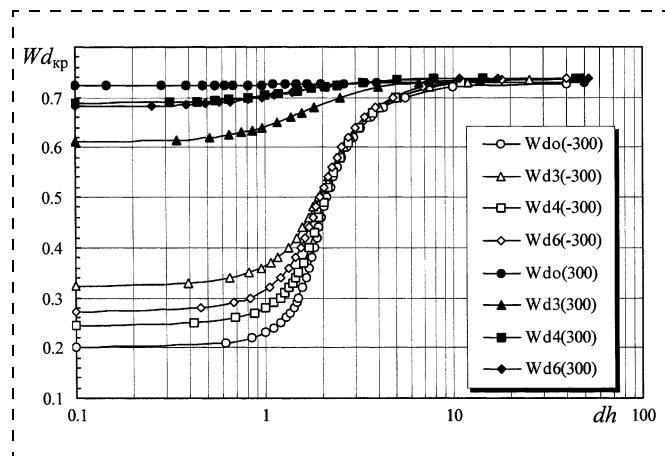


Рис. 8. Зависимости критического прогиба Wd_{kp} для круглой (Wd_0), треугольной ($Wd3$), квадратной ($Wd4$) и шестиугольной ($Wd6$) диафрагмы от отношения dh при $SP = -300$ и 300

размерностью зависимости прогиба диафрагмы от координат и слабо зависит от формы УЭ. Показано, что с увеличением усилий, возникающих в срединной поверхности, Wd_{kp} возрастает. Обнаружено, что при одновременном воздействии электрического поля и однородного внешнего давления на характеристиках УЭ МЭМС возможно появление второй критической точки.

Список литературы

1. Nemirovsky Y., Bochobza-Degani O. A methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators // Jour. of microelectromechanical systems. 2001. V. 10. N 4. P. 601–615.
2. Драгунов В. П. Влияние формы упругого элемента на характеристики микроэлектромеханических систем // Микросистемная техника. 2004. № 1. С. 20–26.
3. Драгунов В. П. Нелинейность упругих элементов микромеханических систем // Микросистемная техника. 2004. № 5. С. 7–13.

НОВАЯ КНИГА

Коллектив авторов:

Твердохлеб П. Е., Короневич В. П., Косцов Э. Г., Дубнищев Ю. Н., Чугай Ю. В., Соболев В. С., Полещук А. Г., Пен Е. Ф., Пискунов С. В., Бессмелтьев В. П., Щепеткин Ю. А., Шелковников В. В., Герасимова Т. Н., Трубецкой А. В., Штейнберг И. Ш., Савельев В. В., Беликов А. Ю.

3D лазерные информационные технологии / Отв. редактор П. Е. Твердохлеб, 2003, 550 с.; Табл. 12; Ил. 275. ISBN 5-85957-026-0

В книге представлены результаты исследований научных сотрудников институтов СО РАН (г. Новосибирск) в области трехмерных (3D) лазерных информационных технологий. Рассмотрены методы синтеза и характеристики толстых органических светочувствительных сред, двухлучковая лазерная микротехнология записи информации во многих разделенных по глубине информационных слоях таких сред, методы построения многослойных интегральных схем с оптическими межсоединениями, методы создания элементов дифракционной оптики с глубоким фазовым профилем, методы лазерного 3D прототипирования, а также 3D измерительные технологии для анализа состояния и определения параметров оптических сред и промышленных изделий. Кроме того, рассмотрены методы компьютерного моделирования 3D процессов распространения световых лучей в градиентном оптическом волокне.

Книга предназначена для научных работников, инженеров и аспирантов, специализирующихся в области оптических информационных технологий, а также для студентов старших курсов университетов физико-технического профиля.

Издательская фирма ЗАО ИПП "ОФСЕТ",
630090, г. Новосибирск, ул. Академика Коптюга, 1.

Адреса электронной почты:
tyerdokhleb@iae.nsk.su, kostsov@iae.nsk.su

УДК 621.3.082.73:004.9

Т. Ю. Крупкина,
Московский институт электронной техники

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНОГО ЭФФЕКТА В ЭЛЕМЕНТАХ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ПРОГРАММ ISE TCAD

Представлена разработанная методика расчета пьезорезистивного эффекта в конструктивных элементах, составляющих основу интегральных преобразователей на тензорезистивных компонентах. Методика построена на базе пакета программ приборно-технологического моделирования ISE TCAD и может быть использована для расчета характеристик пьезорезистивных элементов, и их чувствительности к положению тензорезисторов.

Пьезорезистивный эффект широко используется в элементах микросистемной техники. Он лежит в основе целого ряда преобразователей физических величин и компонентов датчиков. На нем построена работа таких чувствительных элементов, как интегральные преобразователи на тензорезистивных компонентах. Пьезорезистивный эффект позволяет преобразовывать входную информацию о микроперемещениях в полезный электрический сигнал, что является одним из самых распространенных принципов построения чувствительных элементов в датчиках давления, наклонометрах, акселерометрах и др.

Развитие интеграционных процессов в микроэлектронике в последние годы привело к широкому внедрению микроэлектронных технологий в производство микросистемных устройств и формированию интегральной элементной базы микросистемной техники [1, 2]. Это в полной мере относится и к элементам, построенным на основе пьезорезистивного эффекта. Тензорезисторы в этом случае являются частью кремниевого чувствительного элемента (например, мембранны с концентратором механических напряжений) и изготавливаются по интегральной технологии. Поэтому характеристики такого микросистемного элемента непосредственно зависят от воспроизводимости размеров и конструктивно-технологических параметров интегральной части схемы. Расчет интегральных элементов и технологии их изготовления является задачей, решаемой в рамках приборно-технологического моделирования.

Ориентация разработчиков микросистемной техники на микроэлектронное производство ставит задачу эффективного использования всех возможностей пакетов приборно-технологического моделирования в таких проектах. Для этого, кроме расширения спектра моделируемых физических эффектов, необходимо разрабатывать эффективные методики адаптации программной среды к особенностям моделируемых объектов — элементов микросистемной техники.

В данной работе эта задача решалась для моделирования пьезорезистивного эффекта на примере программного пакета ISE TCAD.

Возможности программной среды ISE TCAD

Пакет программных средств ISE TCAD позволяет решать весь круг задач, связанных с приборно-технологическим моделированием элементов интегральных схем, таких как:

- моделирование отдельных операций и маршрутов интегральной технологии;
- определение электрофизических параметров слоев, распределений примеси;
- визуализация результатов технологического моделирования;
- редактирование структуры после технологического моделирования или создание заново структуры для расчета электрических характеристик;
- моделирование электрических характеристик исследуемых элементов;
- расчет фрагментов схем или интегральных структур с навесными элементами;
- определение SPICE-параметров по набору расчетных или экспериментальных вольт-амперных характеристик;
- построение дерева эксперимента в пространстве технологических параметров;
- статистический анализ и оптимизация.

Программа расчета приборных характеристик DESSIS является ключевой в данном пакете. Успешность работы DESSIS обеспечивается сочетанием наиболее совершенных физических моделей с устойчивыми численными методами расчета полупроводниковых приборов. Это позволяет охватывать при моделировании весь диапазон — от глубоко субмикрометровых МОП-транзисторов до мощных биполярных транзисторных структур больших размеров.

Среди огромного разнообразия используемых физических моделей к наиболее важным с точки зрения моделирования элементов микросистемной техники следует отнести модели:

- анизотропии используемых материалов;
- изменения зонной структуры полупроводника под воздействием механических напряжений;
- пьезорезистивного эффекта;

- магнитного поля при решении уравнений переноса для электронов и дырок;
- термических свойств материалов;
- оптической генерации носителей.

Расчет приборных характеристик реализуется с помощью эффективных алгоритмов построения сетки для численного анализа структуры. Существует несколько вариантов создания структур и построения сетки: формирование структуры в результате одно-, двух- или трехмерного моделирования технологического процесса (программа DIOS), двухмерное (MDRAW) или трехмерное (DIP/GIP) создание и редактирование структур.

Возможности пакета расширены за счет программ, позволяющих моделировать электромагнитные (EMLAB), оптические (OPTICS) и механические (SOLIDIS) эффекты.

Принципы работы большинства изделий микросистемной техники включают использование микромеханических элементов. Прежде всего это относится к таким приборам как датчики давления, акселерометры, гироскопы и др.[3]. Программа SOLIDIS была разработана Лабораторией физической электроники Швейцарского Федерального института технологии совместно с фирмой ISE AG и предназначена для расчета всей совокупности процессов, связанных с механическими напряжениями, микроперемещениями в микромеханических конструкциях.

Программа представляет собой инструмент численного нелинейного анализа двух- и трехмерных задач на основе метода конечных элементов с высокоэффективными алгоритмами автоматической адаптации сетки. SOLIDIS моделирует термические, механические, электрические и магнитные явления в микромеханических элементах, их взаимосвязь и взаимовлияние. Таким образом, кроме основных уравнений, описывающих механические эффекты, перенос тепла, двух- и трехмерные магнитостатические эффекты, введены модели, описывающие связь между различными физическими процессами. Так, термомеханические процессы моделируются, в основном, как односторонние, т. е. тепловые характеристики влияют на параметры механических уравнений, но не наоборот. Пьезоэлектрический эффект рассчитывается для материалов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, при этом электростатические силы не учитываются. Пьезорезистивный эффект может быть промоделирован при совместном использовании SOLIDIS и DESSIS. Введены также модели для термоэлектрического и электромагнитного взаимодействия, а также для эффекта Холла. Интерфейс к программе DESSIS позволяет также передавать из SOLIDIS результаты моделирования те-

пловых процессов и учитывать их при определении в DESSIS эффективных коэффициентов переноса.

Расчет пьезорезистивного эффекта

Пьезорезистивный эффект заключается в изменении сопротивления резистора под действием деформации. В полупроводниках это происходит, в основном, за счет изменения удельного сопротивления материала, которое, в свою очередь, зависит от кристаллографического направления тензорезистора. При приложении деформации к кристаллу происходит изменение тензора электропроводности, но экспериментально обычно измеряют ЭДС при заданном токе, т. е. определяют изменение при деформации тензора сопротивления [4]. Кроме того, зависимость электропроводности от деформации является более удобной при теоретическом рассмотрении пьезорезистивного эффекта, на практике же к кристаллу прикладывается механическое напряжение, которое и является входной переменной в этом случае. Пропорциональная зависимость между механическим напряжением и компонентами тензора деформации описывается законом Гука и определяется тензором модулей упругости.

Физическая модель пьезорезистивного эффекта включена в программу DESSIS [5]. Модель представлена линейным расширением уравнения для тока электронов и дырок в монокристаллическом кремнии:

$$J = -S_a(\bar{I} + \bar{\Pi} \cdot \bar{\sigma}) \bar{\nabla} \cdot \Phi_a, \quad a = n, p,$$

S_a — изотропная электрическая проводимость без учета механического напряжения; $\bar{\sigma}$ — тензор механических напряжений; Φ_a — квазипотенциал Ферми; $\bar{\Pi}$ — тензор пьезорезистивных коэффициентов, которые зависят от концентрации примеси и распределения температуры.

Внешнее давление вызывает изменение ширины запрещенной зоны и подвижности. Оба эффекта учитываются при определении значений пьезорезистивных коэффициентов. Задание механических напряжений может осуществляться тремя способами:

- непосредственно при описании модели в DESSIS задаются постоянные значения компонентов тензора напряжений;
- с помощью Physical Model Interface — оболочки, предоставляющей доступ к физическим моделям в DESSIS;
- в виде файла, получаемого в результате расчета механических напряжений в SOLIDIS.

Процесс расчета пьезорезисторного эффекта применительно к микромеханическим конструкциям имеет свои особенности и подводные камни.

Хотя программный пакет ISE TCAD имеет все возможности для полного сквозного моделирования таких структур, требуется использование определенной методики расчета. В противном случае затраты машинных ресурсов на расчет одной задачи становятся неоправданно большими.

Основная принципиальная сложность — слишком большое различие в размерах микромеханической конструкции в целом (как правило, сотни и тысячи микрометров) и пьезорезистивных областей, изготавляемых по планарной технологии (единицы микрометров). В этом случае очевидно, что выполнить численный расчет всего элемента на одной и той же сетке, начиная с моделирования технологического процесса и заканчивая расчетом электрических характеристик в зависимости от механических напряжений в конструкции, практически невозможно. Остальные проблемы связаны, в основном, с передачей данных между программами и носят технический характер. Анализ типовых конструкций и наработанный опыт моделирования позволяет предложить следующую последовательность шагов при расчете микромеханических конструкций с пьезорезистивными элементами.

Шаг 1. Технологический процесс создания диффузионных областей, включая такие операции, как осаждение/травление слоев, ионная имплантация, окисление и диффузия, моделируется в программе DIOS на соответствующей сетке. Результирующие распределения примеси анализируются и подбираются параметры аппроксимирующих распределений.

Шаг 2. В программе DIOS формируется исходная информация о подложке для микромеханической конструкции.

Шаг 3. В редакторе MDRAW в подложке создается область концентратора напряжений.

Шаг 4. Процедура SMESH переводит полученную структуру в исходный файл для программы расчета механических напряжений SOLIDIS.

Шаг 5. В SOLIDIS проводится расчет механических напряжений в исследуемой структуре при заданных граничных условиях.

Шаг 6. Процедура SPLIT переводит файл механических напряжений в покомпонентную форму представления.

Шаг 7. С помощью редактора MDRAW в подложке с концентратором механических напряжений формируются диффузионные области пьезорезисторов, контактов и охранных областей введением аналитических аппроксимаций распределения примеси, полученных на *шаге 1*. Часть подложки с диффузионными областями выделяется в отдельную структуру.

Шаг 8. Процедура DIPSH строит для выделенной части файл механических напряжений для расчета приборной структуры в DESSIS на основе

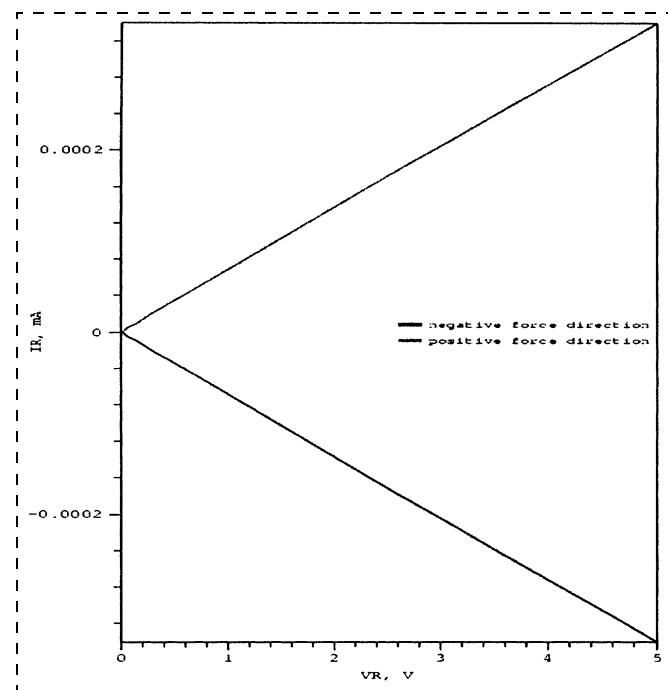


Рис. 5. Анализ результатов расчета с помощью визуализатора INSPECT (*шаг 10*)

информации о по-компонентном представлении, полученном на *шаге 6*.

Шаг 9. Расчет характеристик пьезорезистора проводится в программе DESSIS. Исходная информация о механических напряжениях передается в DESSIS в виде файла, полученного на *шаге 7*.

Шаг 10. Результаты расчетов анализируются с помощью программ визуализации INSPECT и PICASSO.

Рис. 1—4 (см. четвертую сторону обложки) и рис. 5 иллюстрируют последовательность выполнения шагов данной методики.

Предложенная в данной работе методика позволяет не только рассчитать номинальные характеристики пьезорезистивных элементов, но и выявить их чувствительность к положению тензорезисторов относительно концентратора механических напряжений, к разбросу топологических размеров и технологических параметров.

Список литературы

1. Телец В. А., Никифоров А. Ю. Микроэлектронные преобразователи физических величин и компоненты датчиков — перспективная элементная база микросистемной техники // Микросистемная техника. 2001. № 1. С. 6—12.
2. Мальцев П. П., Телец В. А., Никифоров А. Ю. Интегрированные технологии микросистемной техники // Микросистемная техника. 2001. № 11. С. 22—24.
3. Шелепин Н. А. Кремниевые преобразователи физических величин и компоненты датчиков. Датчики и микросистемы на их основе // Микросистемная техника. 2002. № 9. С. 2—12.
4. Бир Г. Л., Пикус Г. Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М.: Наука. 1972. 584 с.
5. DESSIS. ISE TCAD RELEASE 7.0. V. 4a.

СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

УДК 621.38

Ю. Ф. Адамов, д-р техн. наук,
О. А. Сомов, Е. А. Шевченко,
ООО "Юник Ай Сиз", г. Москва

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОИЗВОДСТВО СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ

Предлагается аналитический обзор литературы по вопросам современной технологии и производства систем на кристалле. Выделены основные направления развития электроники. Рассмотрены ограничения кремниевой технологии. Исследовано влияние производственного маршрута на объем выпуска микросхем. Показаны возможные производственные связи и выбор производителя заказных микросхем в зависимости от планируемого объема выпуска и назначения изделий.

Закон Мура в современной микроэлектронике

В 60-е годы XX века известный менеджер и теоретик микроэлектроники Гордон Мур сформулировал тенденцию в развитии технологии микросхем в виде эмпирического правила, получившего название "закон Мура". Согласно этому правилу минимальный размер элементов микросхем уменьшается в $\sqrt{2}$ раз, а число элементов на кристалле увеличивается в 2 раза через каждые 2,5 года. И вот уже 40 лет закон Мура выполняется лишь с небольшими отклонениями. Очевидно, что действие закона Мура ограничено молекулярными размерами и физическими законами, лежащими в основе технологии и физики полупроводниковых приборов. Однако до настоящего времени полупроводниковая промышленность при подготовке планов развития ориентируется на закон Мура. Первый согласованный план развития полупроводниковой промышленности был разработан в США и действовал 10 лет с 1990 по 1999 г. План получил название "дорожная карта" — NTRS (*National technology roadmap for semiconductors*). Следующий план разработан уже на срок 15 лет с 2000 до 2014 г. и стал международным. К участию в его реализации подключились все страны с развитой полупроводниковой промышленностью. План называется традиционно "дорожной карта" ITRS (*International technology roadmap for semiconductors*). Рубеж 2014 г. соответствует достижению минимальных размеров элементов 14...15 нм.

Согласно "дорожной карте" технологическое оборудование, технологические процессы, физи-

ческие структуры элементов микросхем разрабатываются для создания нового производства, обеспечивающего уменьшение размеров элементов в $\sqrt{2}$ раз и увеличение числа элементов вдвое. Технологические маршруты классифицируются по поколениям и унифицируются в одном поколении. "Дорожная карта" позволяет технологам и конструкторам всего мира сосредоточить усилия на создании единственного, полностью совместимого комплекта оборудования и технологического маршрута нового поколения. При этом разработанные и освоенные производственные процессы в дальнейшем серьезно не изменяются. Например, производства, разработанные для минимальных размеров 0,6...0,8 мкм и использующие пластины диаметром 150 мм, не переходят на пластины 200 мм. Производственные участки, работающие с размерами 0,35...0,18 мкм, используют в основном пластины диаметром 200 мм. Выбор диаметра пластин определяется стоимостью их обработки в полупроводниковом производстве, которая в 2—4 раза превышает стоимость пластин. С увеличением размеров полупроводниковых пластин их стоимость увеличивается быстрее, чем площадь, поэтому существует оптимальный размер пластин, обеспечивающий минимальную стоимость производимых микросхем.

Развитие элементной базы БИС

Двадцать пять лет назад в микросхемах использовались только биполярные транзисторы. Ограничения на мощность электронной аппаратуры привели к появлению КМОП-приборов. Сейчас актуально стоит вопрос: чем можно будет заменить КМОП-транзисторы в постоянной гонке за быстродействием и миниатюризацией электронной аппаратуры.

Для МОП-транзистора физический предел длины затвора лежит в области 10 нм, а технологический — в области 15 нм. Сейчас в производстве осваиваются микросхемы с длиной затвора 90 нм. Ведется подготовка производства с размерами 60 нм. Этот размер считается пределом оптической литографии. В лабораторных условиях получены МОП-транзисторы и устройства на их основе с длиной затвора до 8 нм, т. е. уже получены микросхемы на пределе физических ограничений.

Актуально стоит вопрос и о замене кремниевой электроники за пределами действия закона Мура. Очевидно, что электроника разделится на ряд технологически независимых направлений. Уже сейчас формируются следующие направления:

- функциональная электроника, включающая микромеханику, оптоэлектронику, акустоэлектронику, магнитоэлектронику и т. д.;
- традиционная схемотехническая электроника на основе широкозонных полупроводников, позволяющая использовать приборы с размерами 2...4 нм;
- квантовая электроника, использующая в основе вычислений квантовые взаимодействия между атомами. Уже создан прототип квантового компьютера.

Ограничения кремниевой технологии

Физические ограничения. Размер волны Де-Бройля для свободного электрона в зоне проводимости равен 5 нм. Толщина подзатворного диэлектрика — SiO_2 не может быть менее 1 нм как по технологическим причинам (это два молекулярных слоя), так и по причине туннельных токов через диэлектрик. Сейчас технологический предел оценивается в 2,0 нм. Минимальная длина затвора определяется двумя эффектами: усилением транзистора и туннельным током сток-подложка. При высокой концентрации легирующей примеси в подложке туннельный ток будет сравним с током канала. При низкой концентрации области пространственного заряда истока и стока перекрываются, напряжение сток-исток открывает $p-n$ -переход истока, и через подложку течет ток, ограниченный пространственным зарядом (ОПЗ). Усиление транзистора при этом падает. При длине затвора 10 нм и прямом смещении изолирующего перехода исток-подложка еще можно получить усиление в МОП-транзисторе. Практический предел — 15...20 нм.

Емкость затвора минимального транзистора (10×10 нм) составит всего $2 \cdot 10^{-18}$ Ф. При рабочем напряжении 0,8 В и пороговом напряжении 0,2 В в канале не может находиться более шести электронов.

Ток в транзисторе будет меняться дискретно и статистически, так как заряд электрона дискретный. Высокий уровень дробовых шумов, связанных с дискретностью заряда, не позволит использовать максимальное быстродействие МОП-транзистора, определяемое емкостью затвора и крутизной ВАХ.

Статистическим распределением легирующей примеси в подложке под затвором определяется и воспроизводимость порогового напряжения. Для того же минимального транзистора в ОПЗ подложки под затвором будет в среднем пять легирующих атомов. Разброс порогового напряжения будет сравним с напряжением питания.

С уменьшением размеров и токов приборов повышается их чувствительность к космическим час-

тикам и продуктам радиоактивного распада в материалах конструкции БИС. Схемными и конструктивными средствами избежать сбоев нельзя.

Контактные потенциалы в структуре не масштабируются, поэтому напряжение питания нельзя уменьшить до значения менее 0,5 В.

Скорость распределения сигналов в проводниках ограничена скоростью света. В тонких проводниках микросхем ограничение $R-L-C$ параметрами линии связи снижает эту скорость еще в несколько раз.

Ограничения материалов. Для сверхтонких МОП-структур с толщиной диэлектрика ~1 нм возможно применение только SiO_2 , который обеспечивает низкую плотность поверхностных состояний на границе раздела. Для диэлектриков с толщиной 1,5 нм и более возможно применение двухслойных структур, в которых нижний слой — SiO_2 , а верхний — Si_3N_4 , Al_2O_3 или другой диэлектрик с большой диэлектрической проницаемостью. Рассматривается применение диэлектриков типа перовскитов (SrTiO_3), имеющих диэлектрическую проницаемость до 1500.

Для транзисторов с минимальными размерами (~10 нм) невозможно создать статистически однородный профиль легирования подложки, однако уменьшить ток, ограниченный пространственным зарядом, можно, используя ретроградный профиль легирования и снижение температуры до 77 К (жидкий азот). Для создания контактов истока и стока потребуются новые процессы, позволяющие создавать неравновесный уровень легирования кремния выше предела растворимости.

Пропорциональное масштабирование требует уменьшения размеров не только транзисторов, но и проводников. Удельное сопротивление металла определяется длиной свободного пробега электронов, которая зависит от температуры и плотности дефектов. Дефектами служат и границы проводников. Для тонких металлических пленок сопротивление определяется только границами. В пределе все металлические пленки имеют одинаковое сопротивление, определяемое только толщиной. В пленках наблюдается еще и кристаллизация. Если толщина пленки меньше размера кристалла, то пленка рвется на островки и ее сопротивление стремится к бесконечности. Для медной пленки критическая толщина — 30 нм, при ней пленка распадается на островки. Критическую толщину пленок можно уменьшить, используя сплавы (например $\text{Cu} + \text{Zn}$) и многослойные структуры $\text{TaNx} - (\text{Cu} + \text{Zn}) - \text{TaNx}$.

Минимальные литографические размеры ограничены свойствами оптических материалов. Для самого коротковолнового лазера на F_2 , имеющего длину волны излучения 157 нм, используется оптика на основе CaF_2 , сейчас неизвестны оптиче-

ские материалы с большей шириной запрещенной зоны. Для излучения с длиной волны 157 нм минимальный размер рисунка — 60...70 нм.

При получении размеров элементов менее 60 нм с использованием электронной литографии требуется уже неорганические электронорезисты. Размеры органических молекул в резистах составляют десятки нанометров и получить размер менее одной молекулы невозможно. Чувствительность известных неорганических резистов много ниже, чем органических. Сейчас пока еще нет высокопроизводительного электронно-лучевого оборудования, а для его создания требуется определенное время, поэтому закон Мура вероятно будет нарушен для размеров элементов на рубеже 60 нм.

Прогноз предельных параметров МОП-приборов. Специализация кремниевой технологии проявляется уже сейчас, однако за рубежом 80 нм вероятно произойдет полное разделение технологических процессов для процессоров, памяти и мобильного оборудования с автономным питанием. Для скоростных процессоров допустимо применение сложных систем охлаждения и наличие токов утечки в КМОП-приборах. Прогноз предельных параметров приборов для процессоров:

- рабочая температура $-40\ldots-170^{\circ}\text{C}$;
- напряжение питания 0,5...0,8 В;
- длина канала 14...18 нм;
- толщина подзатворного окисла 1,0...1,2 нм.

В схемах памяти утечки недопустимы. Будут использоваться транзисторы разных типов для накопителя и блоков управления. Охлаждение тоже нежелательно. Прогноз параметров следующий:

- рабочая температура до 85°C ;
- напряжение питания 1,2...1,5 В;
- длина канала 40...50 нм;
- толщина подзатворного окисла 2,5...3,0 нм.

Для портативного оборудования с автономным питанием:

- рабочая температура до 85°C ;
- напряжение питания 0,8...1,2 В;
- длина канала 20...25 нм;
- толщина подзатворного окисла 1,5...1,8 нм.

Производственный маршрут и его связь с объемом выпуска микросхем

Развитие электронного машиностроения приводит к повышению точности, производительности и стоимости технологического оборудования.

В каждом новом технологическом поколении стоимость одного элемента снижается, а стоимость комплекта оборудования увеличивается. Эффективное использование оборудования требует его максимальной загрузки. А так как время обработки пластин на разных операциях отличается, то и число единиц оборудования на участке должно быть

обратно пропорционально времени обработки пластин на этом участке. Кроме того, существуют профилактика, плановый ремонт и отказы оборудования. Число единиц любого оборудования не может быть меньше двух. Существует теория организации производства, согласно которой при 100 % загрузке оборудования время полной обработки пластин стремится к бесконечности за счет увеличения времени ожидания в очереди. Значительное увеличение очереди на обработку очень нежелательно, так как это увеличивает необходимые оборотные средства предприятия и, самое главное, снижает процент выхода годных микросхем. В процессе ожидания на оголенных при обработке участках микросхем оседает пыль, происходит абсорбция газов, окисление кремния и т. д. В оптимальном маршруте загрузка оборудования составляет 70...80 %, а время ожидания пластин в очереди на обработку — 30...40 % полного времени обработки.

Современный цех по обработке полупроводниковых пластин с минимальными размерами 0,18...0,25 мкм обеспечивает выпуск около 1000 пластин диаметром 200 мм в сутки. Время полной обработки пластин 32...38 сут при чистом операционном времени 20...24 сут.

Такая организация производственного маршрута называется сетевой. Сетевой маршрут обеспечивает наименьшую себестоимость продукции при больших объемах выпуска, но требует очень больших капиталовложений. Сравним стоимость комплексов оборудования для обработки пластин с разными минимальными размерами:

- 0,8 мкм — 20 млн долл. (оборудование бывшее в употреблении);
- 0,6 мкм — 80 млн долл. (новое оборудование);
- 0,18 мкм — 1 млрд долл.;
- 0,13 мкм — 3 млрд долл.;
- 0,09 мкм — 8 млрд долл.

При такой стоимости оборудования около половины стоимости обработанной пластины с размерами элементов 0,25 мкм и менее приходится на амортизацию оборудования.

Сетевой производственный маршрут делает крайне нерентабельным выпуск мелкосерийных и опытных изделий. Для мелкосерийного и опытного производства используются другой тип оборудования и кластерный маршрут. Оборудование для кластерного маршрута обеспечивает обработку пластин по одной. Каждая пластина является отдельной партией. Оборудование автоматизировано и передает пластины от одной установки к другой автоматически. Технологические установки соединены в одну конвейерную автоматическую линию. Кластерный маршрут требует минимальной численности обслуживающего персонала. Производительность линии определяется временем самого

длительного процесса. В кластерном маршруте возможно использование дублирующих и резервных технологических установок, но обработка пластин по одной всегда остается. За счет снижения производительности стоимость кластерного оборудования значительно меньше, чем сетевого. Количество единиц оборудования в цеху для кластерного производства также в несколько раз меньше. Стоимость полного комплекта кластерного оборудования примерно в 10 раз ниже, чем сетевого. Производительность такого цеха — 20...30 пластин в сутки. Стоимость обработанных пластин для кластерного маршрута в несколько раз выше, чем для сетевого, однако номенклатура выпускаемых изделий может быть очень велика.

Производственные связи

Рост производительности и стоимости оборудования для обработки пластин приводит к тому, что число новых производственных участков в мире сокращается. Только очень крупные корпорации в состоянии самостоятельно построить и загрузить цеха очередного нового технологического поколения. Большая часть производителей микросхем участвует в развитии производственной базы на долевой основе. Причем часто корпоративные производственные мощности бывают загружены не полностью и принимают заказы от сторонних разработчиков.

Другая форма организации производства основана на открытом акционерном финансировании нового производства и выполнении заказов любых сторонних разработчиков. Сейчас фабриками общего пользования выпускается более одной трети всех микросхем, а их доля в объеме выпуска постоянно растет.

На рынке электронных компонентов регулярно случаются кризисы перепроизводства отдельных видов продукции. Корпоративное производство обеспечивает меньшую стоимость микросхем при большом объеме их выпуска, но терпит убытки в периоды кризиса. Открытое производство на заказ менее специализировано на конкретных продуктах, поддерживает большую номенклатуру изделий и поэтому дороже. Однако отсутствие специализации обеспечивает независимость от спроса на отдельные виды микросхем. Создание производственных фирм, открытых для любых заказчиков, стимулировало развитие огромного числа дизайн-центров по всему миру, включая Россию. Одновременно с дизайн-центрами развиваются и фирмы по оказанию услуг разработчикам, сборочные производства, фирмы, обеспечивающие тестирование и испытания микросхем, центры обучения и т. д.

Выбор производителя заказных микросхем

Выбор производственного маршрута определяется техническими характеристиками разрабатываемого изделия, планируемым объемом выпуска и допустимой себестоимостью кристаллов микросхем. Выбранный маршрут должен обеспечивать заданные быстродействие и потребляемую мощность. Расчет себестоимости ведется с учетом уменьшения площади кристаллов и роста стоимости пластин при уменьшении размеров элементов. На каждом этапе развития производственных мощностей существует диапазон минимальных технологических размеров, обеспечивающих минимальную себестоимость кристаллов в массовом производстве. Для современной микроэлектроники — это диапазон 0,5...0,18 мкм. При меньших размерах (0,13 мкм) стоимость обработки пластин пока еще очень высока и не компенсируется уменьшением площади кристаллов. Для размеров более 0,5 мкм стоимость обработки пластин почти не уменьшается, а себестоимость кристаллов растет. Планируемый объем выпуска определяет максимально допустимые затраты на подготовку производства, которые зависят от стоимости фотошаблонов. Затраты на подготовку производства раскладываются на все проданные микросхемы. Стоимость комплекта фотошаблонов увеличивается примерно в 3 раза при переходе к технологии следующего поколения для размеров менее 0,5 мкм. Для больших размеров стоимость шаблонов слабо зависит от минимальных размеров. Наибольшее число новых изделий осваивается на основе технологий с минимальными размерами 0,18 и 0,25 мкм.

Список литературы

1. Keyes R. W. Fundamental limits of silicon technology // Proceedings of the IEEE. 2001. V. 89. N 3. P. 227—239.
2. Semiconductor Industry Association // International technology roadmap for semiconductors. San Jose. CA. SIA. 1999.
3. Benavides D. L., Duley J. R., Johnson B. E. As good as it gets: optimal fab design and deployment // IEEE Transactions Semiconductor Manufacturing, Aug. 1999. V. 12. P. 281—287.
4. Leachman R. C., Hodges D. A. Benchmarking semiconductor manufacturing // IEEE Transactions Semiconductor Manufacturing,, May 1996. V. 9. P. 158—169.
5. Chatterjee A., Gudmundsson P., Nurani R. K. et al. Fabless-foundry partnership: Models and analysis of coordination issues. // IEEE Transactions Semiconductor Manufacturing. Feb. 1999. V. 12. P. 44—52.
6. Nishi Y. Challenges of process integration in silicon-based CMOS technologies // Proc. 1st Int. Symp. ULSI Process Integration. 1999.
7. Robertson F., Allan A. 300-mm conversion timing // Future Fab Int. 1997. V. 1. N 3.
8. Ohmi T., Sugawa S., Kotani K. et al. New paradigm of silicon technology // Proceedings of the IEEE. 2001. V. 89. N 3. P. 394—411.
9. Bohr M. T. Interconnect scaling — The real limiter to high performance ULSI // Tech. Dig. 1995 IEDM. P. 241—244.
10. Doering R., Nishi Y. Limits of integrated circuit manufacturing // Proceedings of the IEEE. 2001. V. 89. N 3. P. 375—393.

11. Frank D. J., Dennard R. H., Nowak E. et al. Device scaling limits of Si MOSFETs and their application dependencies. // Proceedings of the IEEE. 2001. V. 89. N 3. P. 259–287.
12. Davis J. A., Venkatesan R., Kaloyeros A. et al. Interconnect limits on gigascale integration in the 21-st century. // Proceedings of the IEEE. 2001. V. 89. N 3. P. 305–322.
13. Meindl J. D. Low power microelectronics: retrospect and prospect // Proceedings of the IEEE. 1995. V. 83. P. 619–635.
14. Chang H., Cooke L., Hunt M. et al. Surviving the SOC revolution: A guide to platform-based design. Norwell. MA: Kluwer. 1999.
15. Plummer J. D., Griffin P. B. Material and process limits in silicon VLSI technology // Proceeding of the IEEE. 2001. V. 89. N 3. P. 240–258.
16. Plummer J. D., Deal M. D., Griffin P. B. Silicon VLSI technology-fundamentals practice and modeling. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2000.
17. Harriott L. R. Limits of lithography // Proceedings of the IEEE. 2001. V. 89. N 3. P. 336–374.
18. Taur Y., Ning T. H. Fundamentals of modern VLSI devices. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press. 1998.
19. Chandrakasan A. P., Bowhill W. J., Fox F. Design of high-performance microprocessors circuits. IEEE Press. 2001.
20. Bryant R. E., Cheng K.-T., Kahng A. B. et al. Limitations and challenges of computer-aided design technology for CMOS VLSI // Proceedings of the IEEE. 2001. V. 89. N 3. P. 341–362.
21. Бухтеев А. В. Методы и средства проектирования систем на кристалле // Chip news. 2003. № 4. С. 4–14.

ЭЛЕМЕНТЫ МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 681.121:621.3.049.776.43

В. Н. Котов¹, канд. техн. наук, **И. Л. Нещадим²,**
канд. техн. наук, **С. Э. Борисов¹,**
В. Г. Клиндухов¹, **И. И. Черепахин¹,**
¹ НИИ многопроцессорных вычислительных
систем Таганрогского государственного
радиотехнического университета, г. Таганрог
² г. Москва

КОМПЛЕКТ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УНИФИЦИРОВАННЫХ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Представлены семейства микроэлектронных унифицированных аналоговых и частотных датчиков давления, температуры, частоты вращения, угловых и линейных перемещений, а также экспериментальные образцы цифровых датчиков физических величин, разработанных и изготовленных в Технологическом центре микросистемной техники НИИ МВС ТРТУ и предназначенных для работы в системах контроля, управления, сбора информации и диагностики составных узлов и агрегатов автотранспортных средств.

Датчиковая аппаратура, предназначенная для обеспечения работы бортовых систем автоматического контроля, диагностики и управления является неотъемлемой функциональной частью современного автотранспортного средства. Контрольно-измерительная техника мобильных объектов в силу своей специфики зачастую эксплуатируется в жестких условиях окружающей среды, вследствие чего к ней предъявляются наиболее высокие

требования по надежности, массогабаритным, точностным и, в то же время, стоимостным показателям. Кроме того, современные автомобильные датчики должны обладать унифицированными входными и выходными характеристиками, позволяющими упростить их подключение к бортовым информационно-управляющим системам различных производителей. Зарубежные производители (например, см. [1]) предлагают широкий спектр автомобильных сенсорных элементов и датчиковых устройств, в том числе, и изготовленных с помощью технологических процессов микроэлектроники и микросистемной техники.

Ранее нами было отмечено [2], что в настоящее время уже существует ряд датчиков нового поколения отечественного производства, которые в целом удовлетворяют перечисленным выше требованиям. Однако в то же время потребители датчиковых устройств как компонентов электронных и электрических систем (ЭЭС) управления, сбора информации и диагностики, предназначенных для комплексного регулирования процесса функционирования важнейших агрегатов автотранспортных средств, отмечают медленное внедрение в практику новейших отечественных разработок.

Таким образом, на сегодняшний день является актуальным создание высокоточных, надежных датчиковых устройств с нормализованными помехозащищенными выходными сигналами, которые могли бы стать основой первичного сбора достоверной информации и функционирования наибольшего числа ЭЭС важнейших агрегатов мобильного объекта, включенных в иерархическую структуру автоматической диагностики и управления работой автотранспортного средства.

Стремясь удовлетворить запросы потребителей датчиковых устройств и с целью повышения конкурентоспособности продукции на рынке измеритель-

ной аппаратуры, научно-исследовательских достижений и передовых технологий, коллектив Технологического центра (ТЦ) микросистемной техники Научно-исследовательского института многопроцессорных вычислительных систем Таганрогского государственного радиотехнического университета (НИИ МВС ТРТУ) проводит фундаментальные поисковые научные исследования в области синтеза и применения новых материалов, микроструктур и принципов построения датчиковых устройств с новыми свойствами для контроля параметров физических величин. ТЦ НИИ МВС проводит также экспериментальные исследования, направленные на оптимизацию и совершенствование традиционных методов построения сенсорных элементов и применения технологических процессов для их производства с необходимым набором устройств, осуществляющих прием, обработку и передачу информационного сигнала и построенных на самой современной элементной базе. Технологический центр разрабатывает и применяет гибкие методы производства при постоянном снижении затрат на производимую продукцию.

Результатом практической реализации более чем двадцатилетнего научно-исследовательского, экспериментального и производственного опыта в области построения бортовой датчиковой аппаратуры для предприятий авиационно-технической, автомобильной и тракторостроительной отраслей промышленности стал базовый комплект датчиков (БКД) физических величин, объединенных по габаритно-усталновочным размерам, соединительным разъемам, а также входным и выходным характеристикам в унифицированный ряд, представленный в работе [2].

В результате применения новых технических решений, проведения ряда испытаний, в том числе и эксплуатационных, оптимизации конструктивно-технологических вариантов датчиковых устройств построен базовый комплект модернизированных аналоговых, частотных и цифровых датчиков механических величин для мобильной техники, представленный на рис. 1 (см. третью страницу обложки).

Основные технические характеристики датчиковых устройств, входящих в состав БКД, представлены в таблице.

Основные технические характеристики семейства унифицированных датчиков физических величин, разработанных в ТЦ НИИ МВС ТРТУ

Тип датчика	Единица измерения	Диапазон измерения	Основная погрешность измерения, %	Выходной сигнал	Чувствительный элемент
Аналоговые датчики					
Датчик температуры жидкости (ДТЖ –50/+125 ТМ)	°C	–50...+125	1	ток 4–20 мА	Кремниевый сенсор
Датчик температуры жидкости (ДТЖ –50/+200 ТМ)	°C	–50...+200	1	ток 4–20 мА	Кремниевый сенсор
Датчик температуры газов (ДТГ –50/+50 ТМ)	°C	–50...+50	1	ток 4–20 мА	Кремниевый сенсор
Датчик температуры газов (ДТГ –50/+125 ТМ)	°C	–50...+125	1	ток 4–20 мА	Кремниевый сенсор
Датчик давления жидкости (ДИДЖ – 1 ТМ)	МПа	0÷0,1	1	ток 4–20 мА	Кремниевый сенсор
Датчик давления жидкости (ДИДЖ – 10 ТМ)	МПа	0÷1	1	ток 4–20 мА	Кремниевый сенсор
Датчик давления жидкости (ДИДЖ – 100 ТМ)	МПа	0÷10	1	ток 4–20 мА	Кремниевый сенсор
Датчик давления жидкости (ДИДЖ – 400 ТМ)	МПа	0÷40	1	ток 4–20 мА	Кремниевый сенсор
Датчик давления газов (ДИДГ – 10 ТМ)	МПа	0÷1	1	ток 4–20 мА	Кремниевый сенсор
Датчик давления газов (ДИДГ – 200 ТМ)	МПа	0÷20	1	ток 4–20 мА	Кремниевый сенсор
Датчик разрежения (ДРГ – 0,34 ТМ)	мм*Hg	260÷760	2	ток 4–20 мА	Кремниевый сенсор
Датчик угла поворота (ДУП – 100 Т)	град. угл.	0÷100	1	ток 4–20 мА	Индуктивный сенсор
Датчик линейного перемещения (ДЛП – 30 Т)	мм	0÷30	2	ток 4–20 мА	Индуктивный сенсор
Частотные датчики					
Датчик угла поворота (ДУП – 360)	град. угл.	0÷360	2	<i>n-p-n</i> — открытый коллектор $I_{\max} = 20 \text{ mA}$	Индуктивный сенсор
Датчик частоты вращения (ДЧВП – 1000М)	мин ⁻¹	0÷1000	1	<i>n-p-n</i> — открытый коллектор $I_{\max} = 20 \text{ mA}$	Индуктивный сенсор
Датчик частоты вращения (ДЧВ – 10000М)	мин ⁻¹	0÷10000	1	<i>n-p-n</i> — открытый коллектор $I_{\max} = 20 \text{ mA}$	Индуктивный сенсор
Цифровые датчики					
Датчик расхода дизельного топлива (ДРТ –3/50 CAN)	л/ч	3÷50	3	CAN 2.0B	Кремниевый сенсор
Датчик расхода дизельного топлива (ДРТ –5/100 CAN)	л/ч	5÷100	3	CAN 2.0B	Кремниевый сенсор

П р и м е ч а н и я.

1. Рабочий диапазон температур корпуса датчиков –50...+90 °C.
2. При всех внешних возмущающих факторах обеспечивается удвоенное значение основной погрешности.
3. Напряжение питания всех датчиков 12...24 В по ГОСТ 3940—84.
4. В датчиках аналоговых и частотных разъем — колодка 501203; в цифровых датчиках разъем — PC4TB.

БКД состоит из ряда семейств датчиковых устройств, условно разделенных по видам измеряемых физических величин и предназначенных для контроля температуры, давления, параметров вращения и перемещения основных узлов и агрегатов мобильных объектов. Датчики также могут быть классифицированы по следующим признакам:

- назначение и условия эксплуатации;
- технологический процесс изготовления сенсорного элемента;
- принцип действия;
- способы преобразования измеряемой физической величины в нормализованный выходной электрический сигнал датчика.

В зависимости от особенностей технологического процесса изготовления сенсорных элементов представленные аналоговые датчиковые устройства можно отнести к одной из двух основных групп.

В первую группу входят семейства унифицированных датчиков давления и температуры. Первичные преобразователи датчиков давления и температуры, приведенные на рис. 2, изготавливают с использованием микроэлектронного технологического процесса, они обладают всеми техническими и экономическими преимуществами устройств, выполняемых с помощью групповых методов обработки [3, 4].

Датчики давления ДИДЖ-1ТМ, ДИДЖ-10ТМ, ДИДЖ-100ТМ, ДИДЖ-400ТМ, ДИДГ-10ТМ, ДИДГ-200ТМ, ДРГ-0,34ТМ, в дальнейшем ДД, представленные на рис. 3, предназначены для работы в системах контроля, управления, информации и диагностики составных узлов и агрегатов автотранспортных средств в качестве устройств контроля давления жидкостей и газов.

Жесткие условия эксплуатации ДД, обусловленные их назначением и местом установки в мобильном объекте, и заданная точность измерения при совокупности воздействия внешних возмущающих факторов накладывают высокие требова-



Рис. 3 Внешний вид унифицированных датчиков давления:

1 – ДИДГ-10ТМ, ДИДГ-200ТМ; 2 – ДИДЖ-1ТМ, ДИДЖ-10ТМ, ДИДЖ-100ТМ, ДИДЖ-400ТМ, ДРГ-0,34ТМ

ния к методам обеспечения компенсации температурной погрешности датчиков, их механической виброударопрочности и устойчивости, а также временной стабильности показаний на всех этапах построения датчиков — от проектирования топологии кристалла тензореализаторов до реализации схемотехнических решений.

Датчики давления построены на базе интегрального кремниевого тензореализатора давления МДД-1, разработанного и изготовленного в Технологическом центре микросистемной техники НИИ МВС ТРТУ, топология которого представлена на рис. 2, а. МДД-1 имеет мембрану, изготовленную с помощью технологии МЭМС-профилирования размером 1×1 мм, толщина которой варьируется в зависимости от диапазона измеряемых давлений для построения того или иного типа датчика. Собственная резонансная частота колебаний системы мембрана — основание, вследствие особенностей ее формирования и геометрических размеров, многократно превышает частотный диапазон вибраций, возникающих в результате функционирования мобильного объекта, и составляет десятки килогерц. Кроме диффузионных тензорезистивных элементов, включенных в мост Уитстона, топология интегрального сенсорного элемента МДД-1 содержит интегральный компенсационный диффузионный терморезистор, предназначенный для температурной коррекции сигнала разбаланса мостовой схемы.

Разработанный интегральный кремниевый преобразователь давления МДД-1 имеет следующие основные технические характеристики:

- диапазон измеряемых давлений . . 0,1...40 МПа;
- коэффициент преобразования
(в зависимости от типа датчика) . . 0,5...100
мВ/В · МПа;
- нелинейность выходного сигнала < 0,3 %;

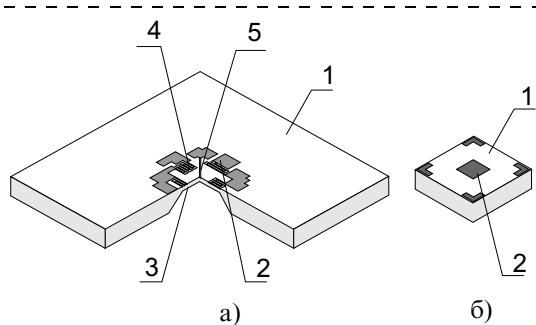


Рис. 2. Сенсорные элементы датчиков давления (а) и температуры (б):

1 – кремниевый кристалл (основание); 2 – металлические контакты; 3 – мембрана; 4 – диффузионный тензорезистор; 5 – компенсационный терморезистор

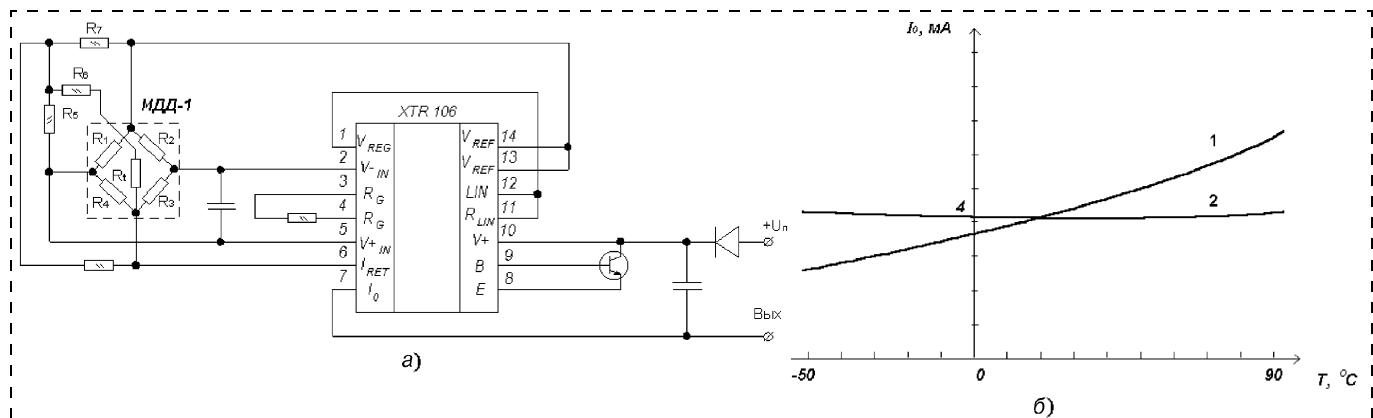


Рис. 4. Схема термокомпенсации дрейфа нулевого сигнала измерительного тензомоста датчиков давления:

а — схема включения МДД-1; б — зависимость нулевого выходного сигнала мостовой схемы тензорезисторов: 1 — без схемы термокомпенсации; 2 — при включении схемы термокомпенсации

- диапазон рабочих температур . . . -50...+90 °C;
- температурная погрешность "нуля" без схемы термокомпенсации . . . < 0,05 %/°C.

Принцип действия ДД заключается в преобразовании измеряемого давления в электрический сигнал разбаланса мостовой схемы тензорезисторов интегрального кремниевого сенсорного элемента МДД-1 и его трансформации в нормализованный выходной сигнал 4...20 mA с помощью специализированного токового усилителя XTR 106.

Схема датчика давления приведена на рис. 4, а. Температурная коррекция сигнала мостовой схемы тензорезисторов осуществляется следующим образом.

При наличии выраженного температурного дрейфа нулевого выходного сигнала тензорезистивной мостовой схемы, например, согласно рис. 4, б, встроенный в МДД-1 терморезистор R_t включается в полумостовую схему R₆, R₇, R_t, сигнал которой через резистор R₅ суммируется с сигналом измерительной диагонали тензомоста, поддерживая его балансировку при изменении температуры датчика.

Технические характеристики по конкретным типам датчиков давления представлены в приведенной выше таблице.

Датчики температуры (ДТ) ДТЖ -50/+125TM, ДТЖ -50/+200TM, ДТГ -50/+50TM, ДТГ -50/+125TM, внешний вид которых представлен на рис. 5, предназначены для работы в системах контроля, управления, информации и диагностики составных узлов и агрегатов автотранспортных средств в качестве устройств измерения температуры жидкостей и газов.

ДТ построены на базе интегрального кремниевого терморезистивного преобразователя TR2, разработанного и изготовленного в Технологическом центре микросистемной техники НИИ МВС ТРТУ,

топология TR2 представлена на рис. 2, б. Основными техническими характеристиками сенсорного элемента TR2 являются:

- диапазон измеряемых температур -50...+200 °C;
- температурный коэффициент сопротивления 0,01 °C⁻¹;
- нелинейность характеристики преобразования 0,5...1,0 %.

Температурный коэффициент сопротивления и рабочий диапазон температур сенсорного элемента TR2 зависят от марки кремния, используемого для его формирования. Номинал TR2 определяется также площадью окна в маскирующем окисле, предназначенного для формирования металлического контакта (см. поз. 2 на рис. 2, б), и выбирается по критериям достаточной чувствительности, а также помехозащищенности датчика при конст-



Рис. 5. Семейство унифицированных датчиков температуры:

1 — ДТЖ - 50/+200TM; 2 — ДТГ -50/+50TM, ДТГ -50/+125TM; 3 — ДТЖ -50/+125TM

руктивном разнесении сенсорного элемента и усилителя-преобразователя на заданное расстояние.

Преобразование электрического сигнала, снимаемого с TR2 (в зависимости от температуры контролируемой среды), в нормализованный выходной сигнал 4...20 мА осуществляется с помощью специализированного токового усилителя.

Вторая группа аналоговых датчиков БКД включает в себя семейства унифицированных токовихревых датчиков угловых и линейных перемещений. В соответствии с принципом действия и технологическим процессом изготовления сенсорного элемента, к данной группе можно также причислить токовихревые датчики частоты вращения.

Основными преимуществами применения токовихревого принципа для построения датчиковых устройств являются следующие:

- датчики линейных перемещений и угла поворота при соответствующем подборе конструкционных материалов и реализации схемотехнических решений имеют характеристику преобразования измеряемой физической величины в электрический сигнал, подчиняющуюся линейному закону с отклонением не более 0,5...1,0 %;
- датчики частоты вращения не требуют применения магнитов и работают с нулевой скоростью вращения при постоянном значении амплитуды выходного сигнала.

Датчики измерения линейного перемещения ДЛП-30Т, угла поворота ДУП-100Т, ДУП-360 (рис. 6) и частоты вращения ДЧВ-10000М, ДЧВП-1000М (рис. 7) предназначены для работы в системах контроля, управления, информации и диагностики составных узлов и агрегатов автотранспортных средств в качестве средств измерения, соответственно, линейного перемещения, угла поворота или частоты вращения контролируемой детали

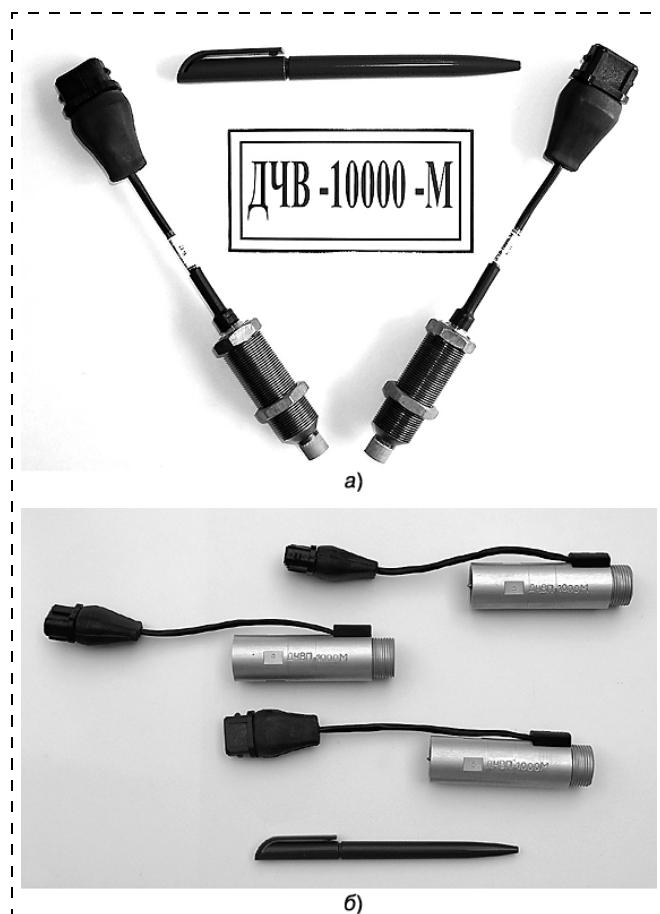


Рис. 7. Семейство унифицированных датчиков частоты вращения:
а – ДЧВ-10000М; б – ДЧВП-1000М

(узла) путем преобразования измеряемой физической величины в аналоговый токовый или частотный сигнал.

Датчики измерения частоты вращения ДЧВ-10000М, ДЧВП-1000М способны функционировать в условиях повышенных температур (до 125 °C) и предназначены для измерения частоты вращения в диапазонах 0...10000 мин⁻¹ и 0...1000 мин⁻¹, соответственно, с формированием десяти импульсов выходного сигнала на один оборот. Кроме того, датчик ДЧВП-1000М является проходным и обеспечивает возможность механического соединения входного и выходного концов вала датчика с задающей вращение и контролирующей аппаратурой.

Принцип функционирования токовихревых датчиков в общем случае заключается в следующем. В качестве чувствительного элемента используется индуктивный сенсор с высокой добротностью и генератор, формирующий в нем высокочастотный сигнал. Когда к сенсору приближается металлический предмет, в металле наводятся вихревые токи, которые поглощают энергию высокочастотного поля сенсорного элемента и тем самым снижают

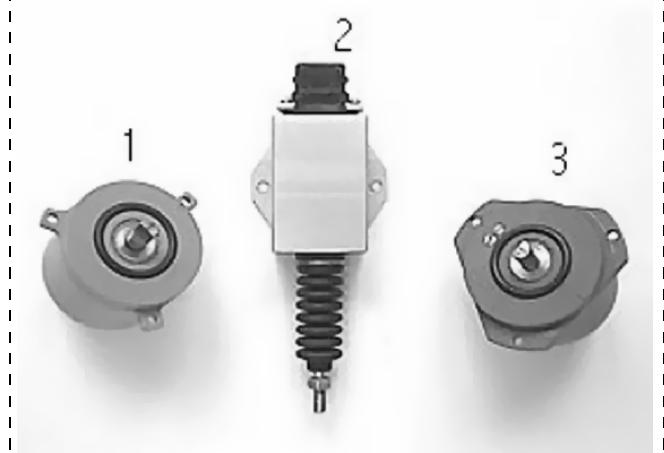


Рис. 6. Семейство унифицированных датчиков угловых (1; 3) и линейных (2) перемещений

добротность. При использовании диодного выпрямителя можно формировать выходное напряжение постоянного тока, пропорциональное размаху генерируемого сигнала. С помощью указанного токовыхихревого метода можно также измерять параметры процесса перемещения, геометрические размеры или зазоры с микрометровой точностью.

Из таблиц видно, что токовыхихревые датчики перемещения и параметров вращения имеют как аналоговый токовый, так и частотный выходные сигналы. Принцип формирования аналогового токового выходного сигнала более наглядно может быть пояснен на примере функциональной схемы датчика угла поворота ДУП-100Т, приведенной на рис. 8, а. Частотный выходной сигнал формируется в соответствии с функциональной схемой датчиков частоты вращения ДЧВП-1000М и ДЧВ-10000М, представленной на рис. 8, б.

Точностные показатели токовыхихревых датчиков зависят и в основном определяются высокими требованиями, предъявляемыми к сенсорным элементам этих устройств, важнейшими компонентами которых являются металлические кулачки и крыльчатки нужной проводимости и специальной формы, динамически монотонно или периодически перекрывающие зону максимальной чувствительности индуктивных сенсоров. Например, угло-

вое приращение радиуса кулачка сенсорного элемента ДУП-100Т составляет 28 мкм/градус; лепестки двухрядной крыльчатки датчика ДУП-360 расположены со сдвигом в 1/2 ширины лепестка для возможности контроля направления поворота. Таким образом, при наименьшей ширине лепестка 1,2 мм сдвиг лепестков должен иметь значение 600 мкм и сохраняться по всей длине окружности.

Достичь такой точности производства компонентов сенсорных элементов ДУП и ДЧВ можно только при использовании специализированного оборудования. Таким оборудованием является автоматизированный лазерный технологический комплекс [5] с соответствующим программным обеспечением, установленный на экспериментально-производственных площадках Технологического центра микросистемной техники НИИ МВС ТРТУ и позволяющий проводить прецизионное (с точностью до 10 мкм) резание и глубокое гравирование различных материалов.

Необходимо отметить также исполнение корпусов и соединительных разъемов датчиков, входящих в состав БКД, которые обеспечивают функционирование датчиковых устройств и передачу информационного сигнала к системе сбора и обработки данных при воздействии повышенной и пониженной температуры окружающей среды, механической вибрации, одиночных и многократных ударов.

С целью дальнейшего совершенствования и расширения эксплуатационных возможностей контрольно-измерительной аппаратуры в НИИ МВС ТРТУ реализуются проекты по разработке и изготовлению базового комплекта микроэлектронных датчиков с цифровыми выходными сигналами (протоколы CAN), предназначенных для функционирования в составе информационно-диагностических систем стационарной и мобильной техники. Экспериментальные образцы цифровых датчиков давления (ДИДЖ-10 CAN) и температуры (ДТЖ-50/+125 CAN) представлены, соответственно, на рис. 9, а и б (см. третью страницу обложки).

В настоящее время разработан, изготовлен и прошел лабораторные испытания комплект макетных образцов микроэлектронных датчиков расхода дизельного топлива с цифровым выходным сигналом (интерфейс CAN 2.0B) — ДРТ-3/50 CAN, ДРТ-5/100 CAN, внешний вид которых представлен на рис. 10. Технические характеристики датчиков расхода приведены выше в таблице.

В основе принципа действия датчиков расхода дизельного топлива лежит разновидность термоанемометрического метода измерения скорости потока (расхода) контролируемой среды. Данный метод [6, 7] в общем случае заключается в импульс-

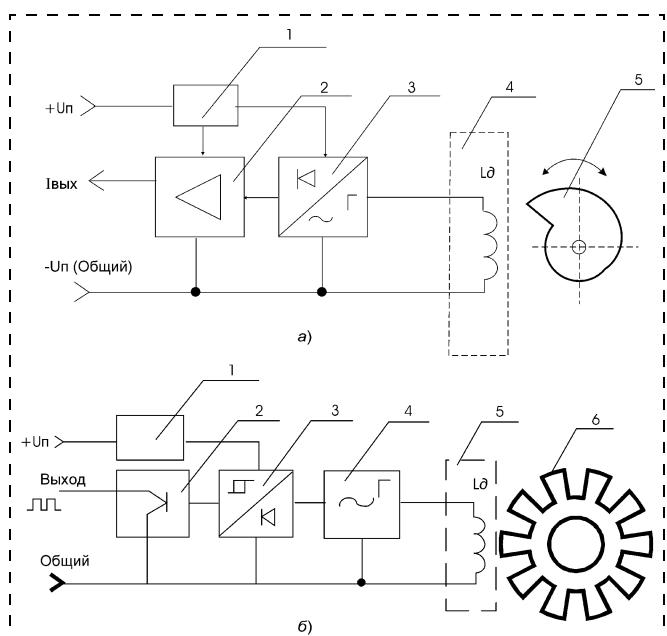


Рис. 8. Функциональные схемы датчиков аналоговых (а) и частотных (б) токовыхихревых датчиков параметров вращения:

а — 1 — стабилизатор напряжения питания; 2 — усилитель с токовым выходом; 3 — преобразователь; 4 — катушка индуктивности L_d ; 5 — кулачок с линейно-изменяющимся профилем;
б — 1 — стабилизатор напряжения питания; 2 — выходной каскад ($n-p-n$ -открытый коллектор); 3 — детектор и триггер Шмидта; 4 — генератор; 5 — катушка индуктивности L_d ; 6 — металлическая крыльчатка

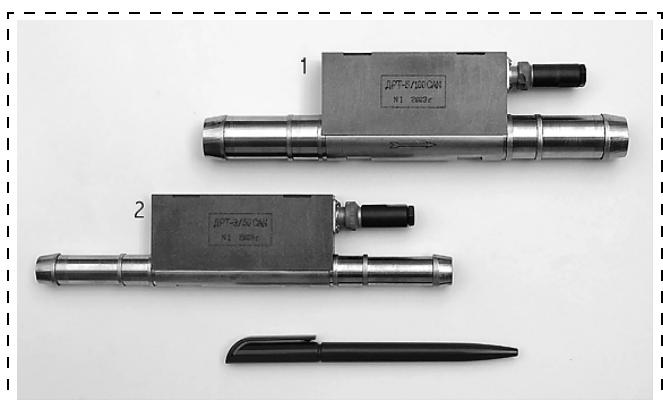


Рис. 10. Экспериментальные образцы цифровых датчиков расхода дизельного топлива:
1 – ДРТ-5/100 CAN; 2 – ДРТ-3/50 CAN

ном перегреве кристалла микротермоанемометра относительно потока до температур $\sim 10\ldots40$ °C и измерении длительности остывания кристалла до заданной температуры (превышающей или равной температуре потока) в зависимости от расхода (скорости потока) топлива.

Преобразование величины расхода топлива как функции полезного сигнала термоанемометра удобно представлять в виде цифрового выходного сигнала расходомера.

Схема термоанемометрического цифрового датчика расхода дизельного топлива приведена на рис. 11. Микротермоанемометр содержит подогревной R_h и измерительный R_{t1} (термочувствительный) резистивные элементы. Измерительный терморезистор включается в одно из плеч мостовой схемы. Для контроля температуры среды в смежное с R_{t1} плечо измерительной мостовой схемы необходимо включать встроенный в поток выносной терморезистивный элемент R_{t2} , идентичный по своим параметрам (размерам, номиналу, ТКС) элементу R_{t1} . Подаваемый на подогревной резистор стабильный импульс тока заданной длительности разогревает кристалл, при этом изменя-

ется номинал измерительного резистивного элемента R_{t1} , что, в свою очередь, приводит к разбалансу мостовой схемы. Сигнал разбаланса моста подается на дифференциальный вход компаратора, регистрирующего состояние перегрева кристалла микротермоанемометра. Временной интервал, в течение которого измерительная схема находится в состоянии разбаланса (время остыния сенсорного элемента до заданной температуры перегрева ΔT), является измеряемой величиной, изменяющейся в соответствии со значением расхода топлива (изменением теплоотвода от кристалла). Функции измерения времени остыния микротермоанемометра, управления подачей подогревенного импульса и формирования выходного сигнала осуществляются с помощью микроконтроллера. Установка температуры перегрева ΔT микротермоанемометра относительно температуры потока проводится путем подбора номинала выносного терморезистора R_{t2} (или варьированием номинала последовательно включаемого подстроечного резистора).

Размеры измерительного кремниевого терморезистора TR2 (см. рис. 2, б) и нагревателя позволяют изготавливать термоанемометрический сенсорный элемент, обладающий высокой теплопроводностью и малой теплоемкостью, что наряду с высокой чувствительностью измерительного элемента к изменению температуры потока ($\text{TKC} - \alpha_t = 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) позволяет обеспечить высокое быстродействие датчика.

К достоинствам данного метода измерения расхода можно отнести:

- возможность измерения расхода жидких сред в расширенном диапазоне скоростей потока без применения байпасных устройств;
- малую температуру перегрева кристалла по отношению к температуре потока, что увеличивает срок службы сенсорного элемента и снижает энергопотребление расходомера;
- предоставление выходного сигнала в цифровом виде, что упрощает процесс его дальнейшей обработки, а также сопряжения со входами бортовых информационно-измерительных и управляемых систем.

Микроконтроллер, имеющий возможность реализации интерфейса CAN 2.0B, содержит 10-разрядное АЦП, позволяющее использовать сигнал от встроенного датчика температуры для коррекции выходного сигнала термоанемометра в соответствии с изменениями температуры окружающей среды.

Датчики расхода дизельного топлива ДРТ-3/50 CAN, ДРТ-5/100 CAN можно отнести к классу интеллектуальных датчиков, так как они проводят окончательную программную обработку и коррекцию сигнала термоанемометра. Выходной сигнал ДРТ-3/50 CAN, ДРТ-5/100 CAN представляет собой численное значение расхода дизельного топ-

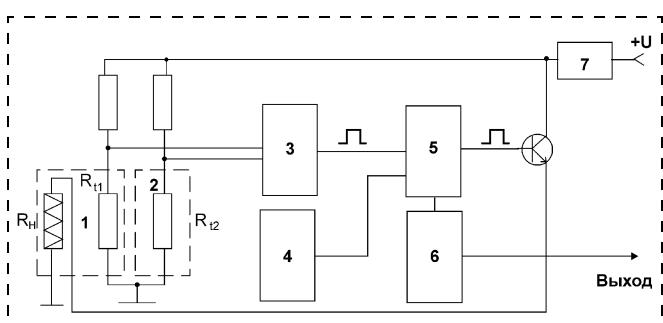


Рис. 11. Схема термоанемометрического цифрового датчика расхода дизельного топлива:

1 – микротермоанемометр; 2 – выносной терморезистор; 3 – компаратор; 4 – встроенный датчик температуры; 5 – микроконтроллер; 6 – CAN трансивер; 7 – стабилизатор напряжения

лива — значение Q (л/ч) в формате с плавающей запятой.

В заключение хотелось бы отметить следующие приоритетные направления дальнейшей работы коллектива ТЦ НИИ МВС ТРТУ в области разработки и изготовления контрольно-диагностической аппаратуры с использованием возможностей технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС):

- совершенствование представленных конструктивно-технологических вариантов чувствительных элементов и датчиковых устройств, повышение их технологичности и надежности;
- расширение номенклатуры сенсорных элементов датчиковых устройств, изготовленных с помощью технологических процессов микроэлектроники и МЭМС-технологии;
- разработка и изготовление высоконадежных датчиковых устройств на основе новых конструкционных материалов и микроструктур для стационарной и мобильной техники, функционирующей в экстремальных условиях окружающей среды и, в первую очередь, — в области экстремально высоких температур (300°C и более).

Список литературы

1. Колпаков А., Карташев Е. "Интеллектуальный" автомобиль и датчики Honeywell // Электронные компоненты. 2003. № 8. С. 97–102.
2. Котов В. Н., Нещадим И. Л., Черепахин И. И., Борисов С. Э., Клиндухов В. Г. Базовый комплект унифицированных датчиков физических величин для электронных и электрических систем мобильных объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 3. С. 42–47.
3. Каляев И. А., Котов В. Н., Клиндухов В. Г., Кухаренко А. П. Микроэлектронные сенсорные системы: опыт создания и применения // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 32–35.
4. Котов В. Н., Клиндухов В. Г., Кобякова Л. П., Канищева Г. А., Щегольков Н. П. Микроэлектронные сенсорные системы в производстве // Наука — производству. 1999. № 11. С. 56–59.
5. Валиуллин А. Г., Горный С. Г., Григорьев А. М., Кириченко В. В. и др. Исследование газолазерной резки металлов с целью получения деталей с высокими характеристиками точности воспроизведения контура. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. 36 с.
6. Котов В. Н., Черепахин И. И. Интегральный кремниевый микротермоанемометр для измерения расхода жидкых и газообразных сред // Микросистемная техника. 2003. № 8. С. 14–20.
7. Котов В. Н., Черепахин И. И., Нещадим И. Л. Микротермоанеметрические расходомерные устройства для информационных систем экстремальной робототехники // Труды конф. "Экстремальная робототехника ЭР-2003". СПб.-М.-Таганрог. 2003. С. 149–156.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 541.147:535.373

М. Ф. Урбайтис, канд. техн. наук,
ЦЕНИ Института общей физики РАН, г. Москва

ОБНАРУЖЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ И АТОМНЫХ ПРИМЕСЕЙ БЕЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

Рассматривается возможность создания серии приборов, позволяющих обнаруживать и идентифицировать примеси следов различных веществ в газообразной и жидкой средах, а также на поверхности тел.

Введение

Задача создания в России нормальных условий для сохранения живого мира, включая человека, имеет ряд взаимосвязанных проблем.

Самой крупной и неотложной проблемой на данный момент времени является состояние среды обитания человека.

Государственные структуры не в состоянии обеспечить мониторинг окружающей среды в надлежащем объеме, необходимом для обеспечения экологической безопасности, поэтому работа по созданию методов обнаружения наноколичеств химических веществ без предварительной подготовки объекта исследования в реальном масштабе времени, является весьма актуальной.

Все используемые в настоящее время методы идентификации молекул, атомов и других частиц основаны на регистрации спектра поглощения в некоторой области длин волн электромагнитного излучения, являющегося своеобразным "портретом" данной частицы.

Основным фактором, ограничивающим чувствительность выбранного метода регистрации, является отношение сигнал/шум в используемых при этом преобразователях энергии.

Многоканальное усиление сигнала, применяемое в современных аналитических приборах, позволяет регистрировать отдельные частицы и кван-

ты энергии, но этому сопутствует усиление шума, который затрудняет интерпретацию результатов и снижает достоверность регистрации явлений, особенно при низких концентрациях искомых веществ.

Предлагаемый метод заключается в использовании ионных кристаллов, способных сорбировать на своей поверхности искомое вещество в качестве детектора спектра. В этом случае регистрация спектра поглощения происходит в одну стадию, при стабильном положении объекта исследования, что позволяет проводить анализ при низких уровнях энергии и достигать образования центров визуализации без дорогостоящих и громоздких стационарных приборов.

Прототипом и основой предлагаемого метода является процесс (явление) сенсибилизации примитивных фотографических светочувствительных материалов.

Поисковые исследования

В 1985 г. в Государственном научно-исследовательском и проектном институте кино- и фотопромышленности при проведении работы по созданию спектронального галогенсеребряного материала обнаружилось, что кристаллы галогенидов серебра, синтезированные в бесколлоидной среде и не имеющие коллоидной оболочки, могут быть очувствлены к любой зоне спектра с помощью веществ, не обладающих в классическом понимании сенсибилизирующими свойствами. Это наблюдение натолкнуло на мысль использовать фотографический процесс на кристаллах галогенидов серебра в аналитических целях.

Первым этапом исследования в данном направлении было изучение возможности синтеза кристаллов галогенидов серебра без коллоидной оболочки и без посторонних включений.

Решение этой задачи потребовало разработки прибора (реактора), обеспечивающего выполнение всех необходимых для синтеза манипуляций. Опытный образец этого прибора был использован для изготовления экспериментальных партий светочувствительных материалов, пригодных для применения в аналитических целях.

Помимо использования для перемешивания реакционной смеси вместо традиционной мешалки, которая не могла обеспечить однородность маловязкой реакционной массы, продувки газом, пришлось изменить состав жидкой фазы, исключив из нее или существенно уменьшив количество воды. Это пришлось сделать по причине ее высокой растворяющей способности: даже бидистиллированная, свежеприготовленная вода, вследствие наличия в ней растворенных ионов, при синтезе кристаллов галогенидов серебра вызывала появление на их поверхности дефектов, которые служили центрами светочувствительности.

Замена воды в жидкой фазе на неполярные растворители позволила получать в приборе, изображенном на рис. 1, бездефектные кристаллы, в которых даже при длительном хранении в защищенном от коротковолновой лучистой энергии месте (металлическом контейнере) не возникало центров светочувствительности.

Способ синтеза кристаллов галогенидов серебра без коллоидной оболочки защищен патентом [6].

Эскиз реактора изображен на рис. 1. Реактор представляет собой термостатированный стеклянный сосуд с приспособлениями, обеспечивающими регулирование состава, температуры, перемешивания реакционной массы, и выращивание микрокристаллов во время синтеза непосредственно на подложке.

Первые партии микрокристаллов галогенидов серебра без коллоидной оболочки были синтезированы на поверхности подслоированных триацетатцеллюлозных пленок, опущенных в жидкую fazу ректора. Условия синтеза позволили получить на их поверхности практически моноярусный слой галогенидов серебра. Эти пленки предполагалось использовать для обнаружения загрязнений окружающей среды. Электронно-микроскопическая фотография этих кристаллов показана на рис. 2.

Однако такой способ синтеза кристаллов, несмотря на широкие возможности получать кристаллы различной формы практически на любой поверхности без коллоидной оболочки, не нашел применения вследствие высокой трудоемкости. В дальнейшей работе синтез кристаллов непосредственно на поверхности пленки не проводился.

Вторая партия кристаллов галогенидов серебра синтезировалась в жидкой фазе в приборе, изображенном на рис. 1. По окончании синтеза жидкая фаза удалялась, а кристаллы извлекались из прибора и сушились в ротационном испарителе.

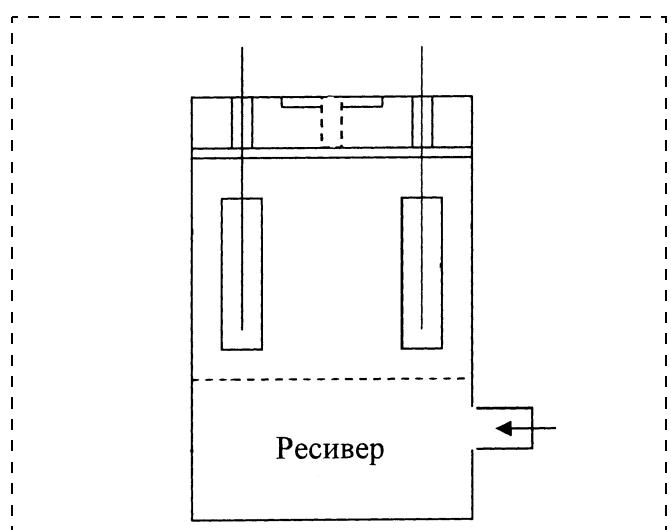


Рис. 1. Эскиз реактора

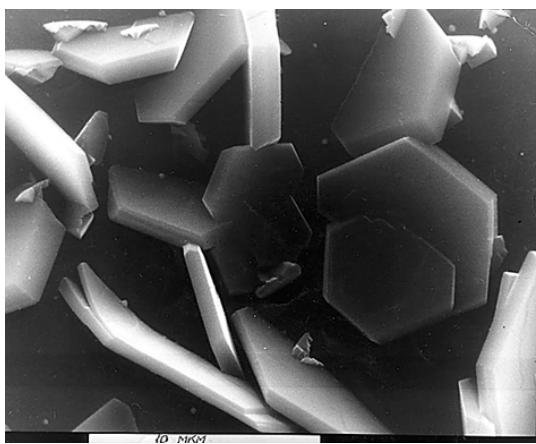


Рис. 2. Электронно-микроскопическая фотография микрокристаллов галогенидов серебра

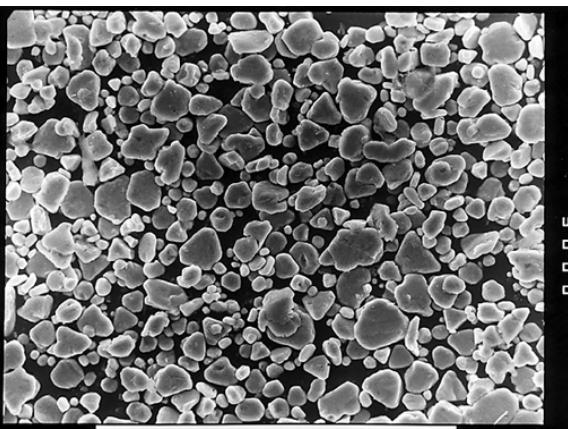


Рис. 3. Микрофотография кристаллов галогенида серебра, синтезированных в приборе, изображенном на рис. 1, и наклеенных на триацетатцеллюлозную пленку

Изготовление на базе этих кристаллов светочувствительных материалов, удобных в использовании, осуществлялось путем их наклеивания на подложку — триацетатцеллюлозную пленку (рис. 3), бумагу или другой листовой материал.

Листы пленки или бумаги с микрокристаллами галогенидов серебра на их поверхности получили условное название "Детектор экологической опасности".

Детектор позволял обнаруживать, изменяя свой цвет, суммарную опасную концентрацию вредных веществ в воде и воздухе, а также ионизирующих излучений.

Детектор испытан в "полевых условиях" на обнаружение микроколичества ряда металлов (свинец, ртуть, цинк, молибден и многих тяжелых металлов, растворенных в воде и в виде аэрозолей), а также бета-, гамма- и жесткого УФ излучения.

При этом суммарная концентрация 5...10 ПДК обнаруживалась при длительном воздействии исследуемой субстанции (несколько суток), вызывая изменение цвета (почернение) детектора без какой-либо его обработки.

Суммарная концентрация 1...5 ПДК обнаруживалась при воздействии исследуемой субстанции в течение 1...5 ч с последующим облучением ярким светом.

Суммарная концентрация до 1-го ПДК обнаруживается после воздействия исследуемой субстанции в течение 5...10 мин, последующего облучения ярким светом или за соответствующим фильтром в течение 2...3 мин и обработки фотографическим проявителем для черно-белой фотографии в течение одной минуты.

По ряду причин "Детектор экологической опасности" не нашел применения, однако открытые у ряда веществ свойства при определенных условиях трансформировать лучистую энергию позволяют

предполагать возможность создания на этой основе высокочувствительных аналитических приборов.

Одним из реальных и перспективных направлений исследования может явиться разработка прибора, обеспечивающего идентификацию наноколичества веществ в реальном масштабе времени. Доказательством возможности создания такого прибора являются исследования, описанные в [6], когда кристаллы галогенидов серебра, синтезированные в бескolloидной среде и не имеющие на своей поверхности коллоидной оболочки, были испытаны для обнаружения наноколичества некоторых веществ. На поверхности этих кристаллов следы кадмия, золота, свинца, меди, марганца и ряда других металлов обнаруживались в количестве, не обнаруживаемом другими известными аналитическими методами.

Следует отметить, что в процессе испытаний описанного детектора все вещества, как органические, так и неорганические, используемые в опытах в качестве определяемых (а их было более 40), при определенных условиях проявляли свойства сенсибилизаторов и при облучении светом определенной частоты вызывали появление на кристаллах центров проявления.

Вопрос идентификации химических веществ способом, использующим сенсибилизирующие свойства этих веществ, до настоящего времени никем серьезно не изучался, а широчайший круг работ, посвященный сенсибилизации галогенсеребряных фотографических материалов охватывает, в основном, только исследование свойств красителей в качестве сенсибилизаторов кристаллов галогенидов серебра, заключенных в полимерную оболочку.

Кристаллы же галогенидов серебра, лишенные коллоидной оболочки, существенно изменяют свои свойства.

Преследуя цель использования эффекта сенсибилизации для аналитических целей, автор, ознакомив-

шись с современным состоянием теории спектральной сенсибилизации фотографических материалов, пришел к выводу, что для решения проблемы необходимо изучить сенсибилизирующие свойства кристаллов, не имеющих коллоидной оболочки, так как ранее изучение их было узко-направленным — для регистрации излучения, а не вещества.

Для проведения поисковых исследований были получены необходимые кристаллы двумя способами: синтезом кристаллов галогенидов серебра в бесколлоидной среде и напылением кристаллов галогенидов серебра на стеклянную и триацетатную подложки в вакууме.

Для изготовления кристаллов галогенида серебра, не имеющих коллоидной оболочки, использовался прибор, изображенный на рис. 1, который обеспечил получение кристаллов желаемой формы и размеров в бесколлоидной среде.

Прибор позволяет синтезировать микрокристаллы с самыми различными свойствами и создавать светочувствительные системы с заранее заданными свойствами. Так, например, в этом приборе были получены микрокристаллы фтористого серебра, светочувствительные свойства которых до настоящего времени не изучены.

Первоначальный вариант этого метода предусматривал визуализацию результата только путем химико-фотографической обработки, которая не позволяла получать результат в реальном масштабе времени, и чувствительность метода находилась в зависимости от размеров кристаллов, поэтому приходилось в течение длительного времени термостатировать жидкую фазу, что было необходимо для получения микрокристаллов больших размеров.

Вторым вариантом получения кристаллов галогенидов серебра было напыление галогенидов серебра в вакууме на стекло или триацетатную пленку. При этом с целью создания центров кристаллизации нанесение галогенидов на стекло пришлось предварять специальной обработкой поверхности стекла.

На рис. 4 изображена микрофотография кристаллов хлористого серебра, нанесенного в вакууме на стекло без подслоя, создающего центры кристаллизации.

Этот вариант давал большой выигрыш в скорости изготовления образцов, но не позволял получать кристаллы заданной формы. Кристаллы желаемой формы, обладающие нужными свойствами, удавалось получить только путем нанесения подслоя, создающего центры кристаллизации при соблюдении регламента выращивания кристаллов.

Лучшие результаты получались при формировании кристаллов путем напыления на подложку

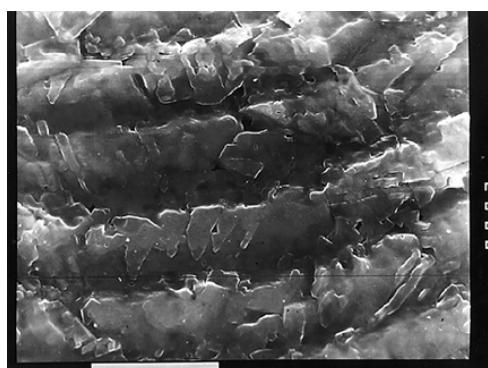


Рис. 4. Микрофотографии кристаллов хлористого серебра

тонкого (желательно моноярусного) слоя металлического серебра с последующим окуриванием этого слоя галогенами.

Поверхность этого материала изображена на рис. 5.

Но визуализация результатов в этом варианте стала возможной только с применением процесса физического проявления в дополнение к химико-фотографической обработке. В результате процесса физического проявления становится возможной визуализация результатов по изменению оптической плотности.

Вместо измерения изменения оптической плотности, вызванной влиянием микропримесей, которое в большинстве случаев требует предварительной химико-фотографической обработки, можно использовать измерение изменения электропроводности слоя галогенида серебра или возникновение ЭДС после воздействия на него искомых микропримесей и облучения определенной зоной электромагнитного спектра. Однако количественное исследование изменения электропроводности слоев галогенидов серебра не проводилось из-за отсутствия соответствующих приборов и методик.

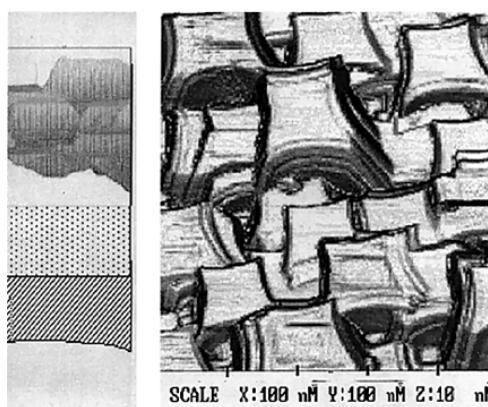


Рис. 5. АСМ-снимок кристаллов йодистого серебра

Использование ионных кристаллов без коллоидной оболочки в аналитических целях может быть проиллюстрировано следующими примерами.

Пример 1. Кристаллы бромистого серебра синтезировались на поверхности подслоированной инертной желатиной триацетатцеллюлозной пленки, помещенной в жидкую фазу реактора с пористой газопроницаемой мембраной. Фаза состояла в начальной стадии синтеза из следующих компонентов:

вода бидистиллят — 20 мас. ч.,
спирт изопропиловый ТУ-ХП-24 — 68...80 мас. ч.

Продувка проводилась воздухом с расходом 0,5...2 л/мин на 1 л жидкой фазы.

Азотнокислое серебро и бромистый цинк, использованные для синтеза, вводились в реактор в виде одномолярных растворов синхронно двумя дозаторами. Объем каждого из растворов — 100 мл.

Первоначальный объем жидкой фазы равен 800 мл. Скорость введения растворов: первая доза по 10 мл — мгновенно, затем со скоростью 10 мл/мин. Синтез проводился при температуре 30 °C, время выращивания кристаллов — 12 ч.

По окончании формирования кристаллов пленки вынимали из реактора, промывали водой и высушивали.

Полученные образцы использовались для обнаружения примесей в воздухе.

Пример 2. Кристаллы бромистого серебра синтезировали в кипящем слое реактора с пористой газопроницаемой мембраной из жидкой фазы, состоящей в начальный момент синтеза из следующих компонентов:

вода бидистиллят — 5 мас. ч.;
спирт изопропиловый ТУ-ХП-24 — 68...80 мас. ч.;
акетон чистый — 15 мас. ч.

Продувка проводилась воздухом с расходом около 2 л/мин на 1 л жидкой фазы.

Азотнокислое серебро и бромистый калий (ГОСТ 4233—69), использованные для синтеза, вводились в реактор в виде одномолярных растворов синхронно двумя дозаторами. Объем каждого из растворов — 100 мл. Первоначальный объем жидкой фазы — 800 мл. Скорость введения растворов: первая доза по 10 мл — мгновенно, затем 10 мл/мин. Синтез проводился при температуре 30 °C.

По окончании формирования кристаллов продувка прекращалась, осадок промывали свежеперегнанным пропиловым спиртом, отделяли от жидкой фазы декантацией и высушивали при непрерывной продувке воздухом.

Кристаллы бромистого серебра, полученные таким образом, не были однородными ни по размеру, ни по форме.

Кристаллы этого образца были наклеены на стекло и триацетатцеллюлозную пленку.

Полученные образцы использовали для обнаружения наноколичества веществ в следующих вари-

антах: триацетатная пленка контактировала с поверхностью, на которой имелись локальные включения следового количества золота, кадмия, кобальта, не обнаруживаемых традиционными методами качественного анализа. После контакта проводили экспонирование и химико-фотографическую обработку, при которой все перечисленные вещества были обнаружены.

Пример 3. Кристаллы бромистого серебра синтезировали в кипящем слое, как в примере 1, но с другими компонентами и режимом. Состав жидкой фазы в начальный момент синтеза:

спирт изопропиловый — 40 мас. ч.;
акетон ч. — 40 мас. ч.;
глицерин 20 мас. ч.

Для синтеза использовали:

одномолярный раствор бромистого цинка в этиловом спирте;

одномолярный раствор азотнокислого серебра в ацетоне;

объем каждого из растворов — 100 мл; первоначальный объем жидкой фазы — 800 мл;

Скорость введения растворов: первая доза по 10 мл — мгновенно, затем без интервала по 10 мл/мин.

После выдержки в реакторе в течение 4 ч при температуре 30 °C был получен образец с размерами кристаллов 0,3—0,5 мкм.

Этот образец использовали для напыления бромистого серебра в вакуумной камере на стеклянную и триацетатную подложки. Напыление проводили при вакууме 10^{-5} мм рт.ст. и температуре испарения 510—580 °C. После 10 мин напыления на подложке образовывался тонкий прозрачный слой бромистого серебра, состоящий из кристаллов размером 0,01—0,02 мкм.

После воздействия на полученный материал парами ртути (одна капля на расстоянии 2 м) при температуре 20 °C и облучения зеленым светом, химико-фотографическая обработка вызывала изменение оптической плотности и возникала электропроводность.

После контакта с поверхностью, содержащей локальные включения эритрозина в количестве 10 моль/мм², и облучения зеленым светом эти включения выявлялись при химико-фотографической обработке в виде потемнения пленки в местах контакта со следами эритрозина.

Для обнаружения микропримесей искомых веществ в газовой фазе был сконструирован прибор, схема которого показана на рис. 6.

В приборе предусмотрена возможность использования неограниченного числа приемных пластин, подготовленных для адсорбции веществ с различными физико-химическими свойствами.

Металлические сетчатые электроды позволяют накладывать электрическое и магнитное поля.

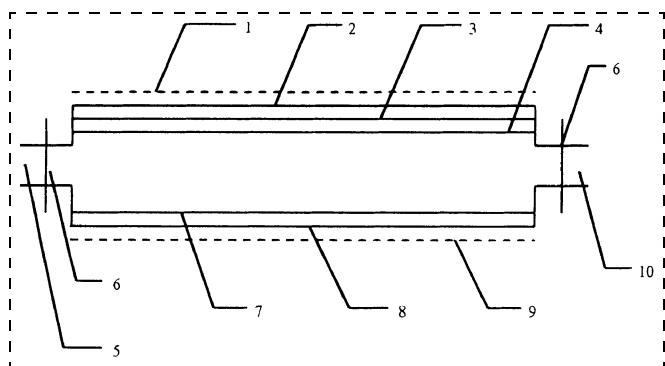
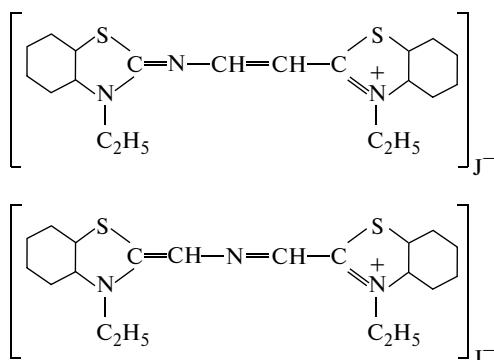


Рис. 6. Схема прибора для обнаружения микропримесей искомых веществ в газовой фазе:

1 и 9 — электроды для наложения электрического и магнитного полей; 2 и 8 — корпус; 3 — приемная пластина; 4 — адгезионный слой; 5 и 10 — патрубки для замены газовой фазы; 6 — воздушные (газовые) заслонки; 7 — светофильтр

Для проверки эффективности прибора были использованы такие красители, используемые в фотографии:



Однако существуют физические методы, которые позволяют добиться визуализации эффекта сенсибилизации в реальном масштабе времени и в то же время сократить процесс формирования кристаллов, например, метод измерения изменения электропроводности, метод измерения возникающей ЭДС и метод с использованием поверхностного плазменного резонанса, которые не требуют выращивания крупных кристаллов.

Применение методов, позволяющих визуализировать мелкие кристаллы и даже отдельные атомы серебра, образующиеся в процессе облучения сенсибилизованных участков исследуемого вещества, позволило получать кристаллы галогенидов серебра не в химическом реакторе, а путем вакуумного напыления тонкого слоя серебра с последующим галогенированием этого слоя.

Заключение

Анализ развития фотографии и фотохимии, а также исследования, проведенные в Государственном научно-исследовательском и проектном институте химико-фотографической промышленно-

сти и Центре естественно-научных исследований (ЦЕНИ) Института общей физики РАН в области идентификации химических веществ позволяют предположить, что на базе ЦЕНИ может быть проведена научно-исследовательская работа по созданию серии методик, которые позволят обнаруживать наноколичества химических веществ в воздухе, воде и на поверхности твердых тел в реальном масштабе времени.

Необходимость данной работы диктуется плохой экологической обстановкой в некоторых районах России и возросшими требованиями к качеству продукции и, особенно, к качеству сырья.

Решение поставленной задачи может осуществляться поэтапно:

1. Разработка методов получения микрокристаллов галогенида серебра, не имеющих коллоидной оболочки, или "квазикристаллов" на инертном носителе и исследование их свойств.

2. Разработка принципов и методик определения структуры веществ, наноколичества которых предполагается обнаруживать в окружающей их среде.

3. Определение требований к источнику света для облучения исследуемого образца и создание источников света для нескольких веществ по согласованию с заказчиком.

4. Разработка методики определения требований к приемным слоям и технологии их изготовления.

5. Разработка метода адгезии исследуемого вещества на поверхности приемного слоя.

6. Изучение возможных побочных химических реакций на поверхности приемного слоя.

7. Выбор метода регистрации энергии, поглощенной исследуемым веществом. Выбор метода визуализации.

8. ОКР, заканчивающаяся созданием действующего макета.

Возглавить работу по созданию системы мониторинга окружающей среды, включающей дистанционное обнаружение взрывчатых, отправляющих веществ и продуктов, используемых в их производстве, мог бы Центр естественно-научных исследований Института общей физики РАН им. А. М. Прохорова.

Список литературы

1. Кульберг А. Я. Экологический кризис: стратегия выживания. М.: Русская энциклопедия, 1994. С. 9, 26—27, 37—39, 117—119.
2. Барщевский Б. У. Квантово-оптические явления. М.: Высшая школа, 1968.
3. Красный-Адмони Л. В. Малосеребряные фотографические материалы и процессы их обработки. М.: Химия, 1986.
4. Спектроскопические методы определения следов элементов / Под ред. Дж. Вайнфорднер. Пер. с англ. М.: Мир, 1979.
5. Миз К. Теория фотографического процесса. М.—Л.: Гостехиздат, 1949.
6. Пат. 2072542. Россия.

ИНФОРМАЦИЯ

Международная научно-практическая конференция "ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ" (INTERMATIC—2004)

7—10 сентября 2004 г., г. Москва

Организаторы конференции

- Третья Московская Международная промышленная Ярмарка "MIIF—2004",
- Российская академия наук,
- Российское агентство по системам управления,
- Российский фонд фундаментальных исследований,
- Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет),
- Институт радиотехники и электроники РАН,
- НОЦ "Волновые процессы в неоднородных и нелинейных средах",
- ОАО "ЦНИИ Электроника",
- ООО "Завод высоковольтных электронных компонентов "ПРОГРЕСС",
- ФГУП НПП "ВОЛНА".

Председатель оргкомитета — академик РАН
Гуляев Ю. В.

Зам. председателя оргкомитета — д-р физ.-мат. наук, проф. Сигов А. С.

Ученый секретарь — Лучников А. П.

Научные направления:

1. Перспективные материалы и компоненты электронной техники.
2. Высокие научноемкие технологии и оборудование.
3. Радиоэлектронные компоненты и приборы.
4. Телекоммуникационные и информационные приборы и системы.
5. Диагностика и проблемы качества.

На конференцию приглашаются ученые, инженеры, аспиранты для рассмотрения проблемных вопросов прикладной физики, математического моделирования, высоких научноемких технологий и оборудования при разработке новых перспективных материалов и компонентов РЭА, высокоэфф-

ективных приборов, телекоммуникационных и информационных систем радио- и электронной техники, новых принципов построения и применения радиоэлектронных приборов, а также для обмена опытом и маркетинга.

Международная научная школа-конференция "ТОНКИЕ ПЛЕНКИ И НАНОСТРУКТУРЫ" (ПЛЕНКИ—2004)

7—10 сентября 2004 г., г. Москва

Организаторы конференции

- Третья Московская Международная промышленная Ярмарка "MIIF—2004",
- Российская академия наук,
- Российское агентство по системам управления,
- Российский фонд фундаментальных исследований,
- Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет),
- Институт радиотехники и электроники РАН,
- Физико-технологический институт РАН,
- Белорусский государственный университет транспорта,
- НОЦ "Волновые процессы в неоднородных и нелинейных средах",
- ООО "Завод высоковольтных электронных компонентов "ПРОГРЕСС",
- ОАО "ЦНИИ Электроника".

Председатель оргкомитета — д-р физ.-мат. наук, проф. Сигов А. С.

Зам. председателя оргкомитета — д-р физ.-мат. наук, проф. Васильев А. Г.

Зам. председателя оргкомитета — д-р хим. наук, проф. Рогачев А. В.

Ученый секретарь — Лучников А. П.

Научные направления:

1. Физика поверхности.
2. Структурообразование, релаксационно-диффузионные и электрические межфазные процессы.

3. Математическое моделирование релаксационных процессов.
4. Радиационная физика тонких пленок и наноструктур.
5. Полимеры с легирующими и ультрадисперсными добавками.
6. Активные пленочные структуры и гибридные нанокомпозиты.
7. Технологии получения тонких пленок и наноструктур.
8. Защитные и физико-механические свойства пленок.
9. Наноэлектроника и новые применения пленок и наноструктур.
10. Методы и приборы контроля пленок.

На школу-конференцию приглашаются ученые, инженеры, аспиранты для рассмотрения вопросов физики и математического моделирования релаксационных процессов в тонких пленках и наноструктурах, имеющих сложную макроструктуру с на-

личием межфазных границ, а также технологии их получения и применения.

Опубликованные Материалы конференций "INTERMATIC—2004" и "ПЛЕНКИ—2004" учитываются ВАК РФ как основные публикации для докторских диссертаций.

Наиболее оригинальные доклады будут рекомендованы Оргкомитетом для опубликования в научно-технических журналах "Электронная промышленность", "Наукоемкие технологии" и "Микросистемная техника".

Конференции "INTERMATIC—2004" и "ПЛЕНКИ—2004" проводятся совместно 7–10 сентября 2004 г. в Москве на базе Третьей Московской Международной промышленной Ярмарки "МИФ—2004" в Выставочном комплексе "КРОКУС-ЭКСПО", МИРЭА и ОАО "ЦНИИ Электроника".

Принимается рекламная информация по тематике конференций.

**Справки: тел./факс (095) 306-26-64
(с 9.00 до 22.00)**

Пятая международная конференция ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ—2004. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ И МНОГОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ

20—25 сентября 2004 г.
п. Кацивели, Крым, Украина

Организаторы и спонсоры

- Министерство образования и науки (МОН) Украины
- Министерство образования и науки Российской Федерации
- Отделение информатики Национальной академии наук (НАН) Украины
- Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН)
- Государственный фонд фундаментальных исследований МОН Украины
- Российский фонд фундаментальных исследований

- Морской гидрофизический институт НАН Украины
- Таганрогский государственный радиотехнический университет
- Институт проблем искусственного интеллекта (ИПИИ) МОН и НАН Украины
- Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем Таганрогского государственного радиотехнического университета (НИИ МВС ТРТУ)
- Тернопольская академия народного хозяйства МОН Украины

Секретариат программного и организационного комитетов

**347928, Россия, г. Таганрог, ГСП – 284,
ул. Чехова, 2, НИИ МВС ТРТУ.**

**Телефоны для справок:
(8634) 315-493, 615-459, 36-03-76**

**Факс:
(8634) 36-03-76, 615-459**

E-mail: mvs@tsure.ru

Internet: <http://www.mvs.tsure.ru>

Кухаренко Анатолий Павлович

Бронзов Владимир Олегович

Иванова Наталья Юрьевна

**83050, Украина, г. Донецк,
пр. Б. Хмельницкого, 84, ИПИИ**

Телефоны для справок:

+10 38 (062) 337-33-35, 337-01-70

E-mail: press@iai.donetsk.ua

Internet: <http://www.iai.donetsk.ua>

Иванова Светлана Борисовна

Пигуз Валентина Николаевна

Гершанник Валерий Григорьевич

Научные направления конференции

- Концептуальные проблемы создания систем искусственного интеллекта (ИИ)
- Фундаментальные основы интеллектуальных многопроцессорных систем (ИМС)
- Алгоритмические и математические основы ИИ
- Аппаратно-программные средства ИИ
- Интеллектуальные системы принятия решений и управления
- Обучающие и экспертные системы
- Распознавание образов и изображений
- Нейронные сети и нейросетевые технологии
- Информационные технологии для работы с естественными языками и речью
- Интеллектуальные робототехнические и мультиагентные системы
- Системы искусственного интеллекта и проблемы информационной безопасности

В рамках конференции будет проведена научная сессия по проблематике "Интеллектуальные много-процессорные системы" по следующим направлениям:

- Теория и практика создания ИМС
- Алгоритмы, языки и технологии программирования для ИМС
- Элементная база ИМС

- Метакомпьютинг и GIRD-технологии
- Интеллектуальные системы цифровой обработки сигналов и изображений

Также на конференции "Искусственный интеллект—2004" будет организована **секция по проблемам реализации международного проекта "Компьютеризация естественных языков (КЕЯ)".**

Тематика секции по КЕЯ

1. Извлечение из текстовых материалов их содержания и сохранение его в базах данных и знаний.
2. Распознавание речи на национальных языках.
3. Содействие естественным языкам для их правильного развития.
4. Развитие технологий обучения национальным и иностранным языкам.
- 5.. Автоматический поиск и извлечение знаний из компьютерного текста.
6. Автоматический перевод с одного языка на другой язык.
7. Автоматическое преобразование компьютерного текста в устную речь.
8. Создание робота для сканирования книг.

Одновременно с работой конференции будут проведены **Международные научные молодежные школы "Высокопроизводительные вычислительные системы" и "Микросистемная техника"** (руководители чл.-корр. РАН В. А. Лопота и чл.-корр. РАН И. А. Каляев).

Также будет организована **выставка аппаратно-программных продуктов** по направлениям работы конференции и проведен **международный турнир по виртуальному футболу**.

CONTENTS

**Samoilovich M. I., Kleshcheva S. M., Belyanin A. F.,
Jitkovsky V. D., Tsvetkov M. Yu.** *3D-Nanocomposites Based
on Ordered Packing of Silica Nanospheres* 3

The fabrication technology for ordered packings from monodisperse silica nanospheres has been developed. This allowed new types of materials to be created: 3D superlattices, including the so-called photonic crystals or photonic band-gap materials.

Experiments to fill an interglobular space with semiconductors, superconductors, optically amplified, ferromagnetic and other materials have been carried out via specially devised techniques. Unique three-dimensional nanosystems thus created were found to exhibit quantum-size and other nanoscale effects such as, for example, nonlinear interaction between individual nanocluster electron subsystems.

Bakunov M. I., Bodrov S. B. *Intermode Conversion in the Probe
of a Near-Field Optical Microscope* 7

The propagation of light through a metal-overcoated tapered fiber tip used as a probe in the aperture scanning near-field optical microscopy is investigated numerically by means of the cross-section method. Intermode conversion and modes cutoff in the probe are included. It is shown that in the conventional probe with a taper angle of $\sim 10^0$ only a few percents of the input power are transformed into the HE_{11} mode with minimal cutoff radius. This results in a low throughput of the probe. Two easily manufacturable designs of the probe tip which can provide an increase in energy transformed to HE_{11} mode and, as a result, a tenfold enhancement of the throughput have been proposed.

Scherbakov A. V., Melnikov L. A. *Glass Fiber Technology
in Microsystems and Photonics* 13

The description of the main features of glass fiber technology, characteristics of structures, and application issues are presented. The examples of products manufactured using this technique are demonstrated, including X-ray lenses, microstructure fibers, and micromechanical devices.

Parilov A. A., Poddubnov V. V. *Hemisphere Magnetohard Film
of an Alloy Nd-Fe-B and their Application in Microsystems* 17

The 50–60 microns hemisphere magnetohard of a films received by a iono-plasma method of dispersion of a cast target of an alloy $Nd_{16}Fe_{76}B_8$ are described. The results of research of distribution of a magnetic field around films of a flat and not flat configuration are reduced. The assumption about radial crystal texture of a films, having a configuration, of rotation is put forward.

Dragunov V. P. *Nonlinear Model of Elastic Element
for MEMS* 19

In this paper, the analytical equations which help to simulate behavior of elastic elements for microelectromechanical systems are presented.

Krupkina T. Yu. *A Technique of the Analysis Piezoresistive Effect
in the Elements of Microsystem Engineering with Use of the Software
Package ISE TCAD* 25

Method for analysis of piezoresistive effect in the constructive elements of integrated tensoresistive transformers of physical values is proposed on the basis of ISE TCAD tools for development, modeling and optimization of microelectronic processes, devices and systems. This method may be used for simulation of piezoresistive element's characteristics and theirs sensitiveness to the position of tensoresistors.

Adamov Yu. F., Somov O. A., Shevchenko E. A. *System On Chip
modern technology and production* 28

The article offers an analytic review of literature concerning Systems On Chip modern technology and production, and outlines main directions of electronics development. It analyzes silicon technology limitations and industrial flow influence on IC's yield. The article also describes possible production relations and choosing an ASIC-manufacturing vendor depending on IC's function and planned yield.

**Kotov V. N., Neshadim I. L., Borisov S. E., Klindukhov V. G.,
Cherepakhin I. I.** *Kit of the Microelectronic Unitized Sensors
of Physical Quantities for Electronic and Electrical Systems
of Automobile Engineering* 32

The sets of the microelectronic unitized analogue and frequent pressure, temperature, rotating speed, angular and linear movements sensors and also experimental samples of digital sensors of physical quantities, designed and manufactured in Technological Center of Microsystem Engineering Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems of Taganrog State Radioengineering University and intended for operation in monitoring systems, control, data acquisition and diagnostic of multicomponent assemblies and aggregates of vehicles systems are introduced.

Urbajtis M. F. *Detection and Identification of Molecular
and Nuclear Impurity without Preliminary Preparation
of Object in Real Time* 39

The opportunity of creation of a series of devices to detect and to identify an impurity of traces of various substances in gaseous and liquid environments, and also on a surface of body are considered.

For foreign subscribers:

Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(095) 284-5008. Fax: +7(095) 281-3798

The journal bought since november 1999.

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

ISSN 1684-6419.

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

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

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. Телефон редакции журнала **(095) 269-5510**. E-mail: it@novtex.ru

Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати. Свидетельство о регистрации № 018929 от 10.06.99.

Дизайнер Т.Н. Погорелова. Технический редактор И.С. Павлова. Корректор А. В. Лабудь

Сдано в набор 01.04.2004. Подписано в печать 07.05.2004. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Усл. кр.-отт. 7,84. Уч.-изд. л. 7,05. Заказ 831. Цена договорная

Отпечатано в Подольской типографии ГУП ЧПК, 142110, г. Подольск, ул. Кирова, 25