

Выпускается при содействии
Министерства промышленности, науки и технологий Российской Федерации,
Министерства образования Российской Федерации,
Российской Академии наук

Издается с 1999 г.
ISSN 1684-6419

Главный редактор
Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора
Лучинин В. В.

Редакционная коллегия:

Антонов Б. И.
Аристов В. В.
Белоус А. И.
Быков В. А.
Васильев А. А.
Васильев В. В.
Волчихин В. И.
Гапонов С. В.
Горнев Е. С.
Градецкий В. Г.
Журавлев П. В.
Захаревич В. Г.
Каляев И. А.
Кальнов В. А.
Карякин А. А.
Климов Д. М.
Кузин А. Ю.
Лифшиц В. Г.
Мокеров В. Г.
Мокров Е. А.
Никитов С. А.
Норенков И. П.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросяни К. О.
Петрунин В. Ф.
Путилов А. В.
Пяташев Е. Н.
Сауров А. Н.
Сигов А. С.
Станкевич В. Г.
Старостин А. К.
Степанов Ю. И.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.
Чаплыгин Ю. А.

Редакция:

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

Учредитель:

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

Читателю о журнале	2
ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ	
Векшин М. М., Хотнянская Е. Б., Никитин В. А., Яковенко Н. А. Интегрально-оптический поляризационный рефрактометр	3
Королев М. А., Чаплыгин Ю. А., Тихонов Р. Д. Интегрированные микросистемы — перспективные элементы микросистемной техники.	6
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ	
Никольский К. Н., Батулин А. С., Купряшкин А. С., Чёсов Р. Г., Шешин Е. П. "Эффект кольца" при интенсивной автоэлектронной эмиссии	8
Михайлов П. Г. Формообразующие процессы создания микромеханических устройств	10
Глушанин С. В., Тополов В. Ю. Анализ электромеханических свойств 1—2-комполитов на основе сегнетопъезокерамики	13
КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ	
Гайкович К. П., Дряхлушин В. Ф., Жилин А. В. Улучшение разрешающей способности СБОМ-изображений на основе учета передаточной функции зонда	19
Каляев И. А. Алгоритм целераспределения в "туче" микророботов	21
Агеев О. А., Светличный А. М., Кочеров А. Н. Оптимизация распределения температуры и термоупругих напряжений в пластине SiC при быстром термическом инфракрасном нагреве	25
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА	
Адамацкий А., де Лейси Костелло Б., Мелхис К., Ратклив Н., Вессницер Я., Рамбиди Н. Г. Управление автономными мобильными роботами на основе химических сред типа Белоусова—Жаботинского	29
Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Определение характеристик вибраций микрообъектов с помощью лазерного излучения	34
НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ	
Ландышев А. В., Битюцкая Л. В., Козаков А. Т. Исследование поверхности сплава (Bi, Sb) ₂ Te ₃ электронно-зондовыми методами	42
Новости нанотехнологий.	46
Contents	48

Аннотации статей журнала на русском и английском языках доступны по сети Internet
по адресу: <http://www.microsystems.ru>.

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

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

Дизайнер Т.Н. Погорелова. Технический редактор И.С. Павлова. Корректор М.Г. Джавадян

Слано в набор 30.04.2003. Подписано в печать 11.06.2003. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Усл. кр.-отг. 7,84. Уч.-изд. л. 7,18. Заказ 893. Цена договорная

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

Читателю о журнале

Решением ВАК Минобразования России журнал "Микросистемная техника" включен в Перечень научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук (Бюллетень ВАК Минобразования России, 2003, № 2).

Междисциплинарный теоретический и прикладной научно-технический журнал "Микросистемная техника" освещает современное состояние, перспективы и тенденции развития микросистемной техники (МСТ), рассматривает новые разработки и внедрения микросистем в различные области науки и техники, технологии и производства.

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

Положительную роль в развитии микросистемной техники сыграло Министерство образования Российской Федерации, открывшее в 2000 г. подготовку инженеров по новой специальности — 201900 "Микросистемная техника".

Микросистемная техника (МСТ), реализуемая на микроуровне, обеспечивает функционирование не только в условиях стационарного твердого тела, но и в случае, когда объект или часть объекта микросистемы или контактирующая с ним среда находятся во взаимной пространственно-временной динамике. Особенностью МСТ является привнесение современной технологии массового производства, свойственной микроэлектронике, в производство традиционных устройств и механизмов повышенной сложности, характерной для радиотехники, оптики, машиностроения, приборостроения и биомедицины. Это сочетание позволяет изготавливать уникальные многофункциональные устройства с микрометровыми размерами и низкой стоимостью. Развитие микросистемной техники для научно-технического прогресса может иметь такие же последствия, какие оказало появление микроэлектроники на становление и современное состояние ведущих областей науки и техники.

Статьи в журнале систематизированы по следующим основным рубрикам:

- **Элементы МСТ и микросистемы** — чувствительные элементы и преобразователи информации для физических величин, химических элементов, биологических материалов; измерительные устройства и переключатели — микромеханизмы, микроинструмент, микрзеркала; источники энергии и движения — микродвигатели, микротурбины и микросистемы энергообеспечения; микроэлектромеханические и микрооптоэлектромеханические системы (МЭМС/МОЭМС); радио- и СВЧ микроэлектромеханические фильтры; фотонные

кристаллы; технологические микросистемы; микромашины.

- **Материаловедческие и технологические основы МСТ** — традиционные и перспективные материалы для объектов МСТ: материалы поверхностной и объемной микромеханики; адаптивные ("умные") материалы; специальные технологии МСТ — LIGA-технология; корпускулярно-лучевое микроформообразование, волоконная технология.
- **Нанотехнология и зондовая микроскопия** — зондовый инструмент для СТМ и АСМ, многозондовая память, магнито-, пьезо- и сегнетоэлектрики с нанокристаллами, гетероструктуры и приборы с квантовыми точками, зондовая микроскопия органических и неорганических материалов, наноэлектромеханические материалы, наномашин.
- **Молекулярная электроника и биоэлектроника** — биотехнические микросистемы и биореакторы; "лаборатория на кристалле", ДНК-чипы и ДНК-процессоры; органические и полимерные полупроводники; приборы и системы с использованием молекулярных объектов в качестве элементной базы вычислительных устройств; квазибиологические нейросистемные подходы для вычислений и анализа решений.
- **Конструирование и моделирование МСТ** — моделирование и проектирование материалов, процессов и элементов МСТ; САПР для МСТ; управление микросистемами и их распределенными сообществами.
- **Применение МСТ** — конструирование приборов и микромашин на основе элементной базы МСТ; сборка, испытания и сертификация макросистем; авиа- и автоэлектронные компоненты на основе МСТ; мини- и микроробототехнические системы наземного и подземного, надводного и подводного, воздушного и космического базирования; спектроанализаторы.
- **Страничка Российского фонда фундаментальных исследований.**
- **Информация** — конференции, совещания, выставки, новости науки и техники, обзоры специальной литературы, учебная литература по МСТ и т. п.

Аннотации статей журнала на русском и английском языках доступны по сети Internet по адресу: <http://www.micrisystems.ru>.

Журнал распространяется по подписке.

Оформить подписку можно в отделениях связи (индекс по каталогу Роспечати 79493) или непосредственно в редакции (107076, Москва, Стромынский пер., 4; изд-во "Новые технологии", тел./факс 269-55-10, e-mail: it@novtex.ru) с указанием адреса получателя.

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 621.383

М. М. Векшин, канд. физ.-мат. наук,
 Е. Б. Хотнянская,
 В. А. Никитин, канд. техн. наук,
 Н. А. Яковенко, д-р техн. наук,
 Кубанский государственный университет,
 г. Краснодар
 e-mail: vekshin@phys.kubsu.ru

ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ РЕФРАКТОМЕТР

Приведено описание разработанного высокочувствительного микроволнового рефрактометра, использующего поляризационный принцип преобразования. В основе конструкции — четырехслойная волноводная структура, состоящая из диэлектрических изотропных слоев с выраженным модовым двулучепреломлением. Сдвиг фаз ортогонально поляризованных волн линейно зависит от показателя преломления покровной среды. Чувствительность датчика составляет $1 \cdot 10^{-6}$.

В микрооптических датчиках для детектирования химико-биологических реагентов в последнее время все шире исследуются возможности использования эффектов взаимодействия затухающего поля направленных оптических волн с исследуемым реагентом. Оптические датчики на основе призмного возбуждения поверхностных волн в последние несколько лет уже выпускают иностранные фирмы Texas Instruments (проект "Spreeta"), VIAcore, Affinity Sensors для работы в системах контроля параметров биомолекулярных взаимодействий. Возможности интегральной оптики позволяют легко создавать многоканальные сенсоры на основе микроволноводов, что технически сложно добиться в датчиках на призмном элементе возбуждения поверхностных электромагнитных волн.

Целью настоящего исследования является разработка оптоэлектронного датчика биомолекулярных реагентов и взаимодействий рефрактометрического типа с применением эффекта интерференции ортогонально поляризованных поверхностных электромагнитных волн в микроволноводах. Установлено, что эффект интерференции ТЕ- и ТМ-поляризованных направленных волн имеет резко выраженную чувствительность к параметрам слоистых сред, образующих многослойный микроволновод, при оптимальном подборе последних

[1–2]. Основой датчика является комбинированная четырехслойная структура на базе слабонаправляющего волновода в стекле, покрытого высокопреломляющей диэлектрической пленкой. Линейно поляризованный свет возбуждает на входе волновода ТЕ₀- и ТМ₀-моду. Выходной сигнал активной области датчика длиной L проходит пространственный волноводный ТЕ/ТМ расщепитель в виде асимметричного четырехслойного V-разветвителя и 45°-ориентированный поляризатор. Сдвиг интерференционной картины вследствие изменения параметров покровной среды фиксируется с помощью фотоприемной ПЗС-матрицы и блока электронной обработки. Схема датчика показана на рис. 1.

Конструкция проектировалась на основе одномодовых канальных волноводов, сформированных путем ионного обмена $K^+ \leftrightarrow Na^+$ в подложках оптического стекла. Нанесение высокопреломляющей диэлектрической пленки (TiO_2) позволяет получить значительное модовое двулучепреломление.

Для теоретического и экспериментального изучения использовался канальный и планарный ионообменный волноводы в стекле со ступенчатым или градиентным профилем показателя преломления (показатель преломления стеклянной подложки 1,51 и приращение показателя преломления на поверхности 0,005; эффективная глубина диффузии 2 мкм, длина полны 0,6328 мкм). Показатель преломления пленки TiO_2 — 2,27. Показатель преломления покровного слоя в активной области — 1,37, в остальной области (защитный слой SiO_2) — 1,46.

Разработана физико-математическая модель функционирования микродатчика с помощью электродинамического анализа распространения ТЕ- и ТМ-волн с применением методики распространяющегося пучка и стандартного модового анализа.

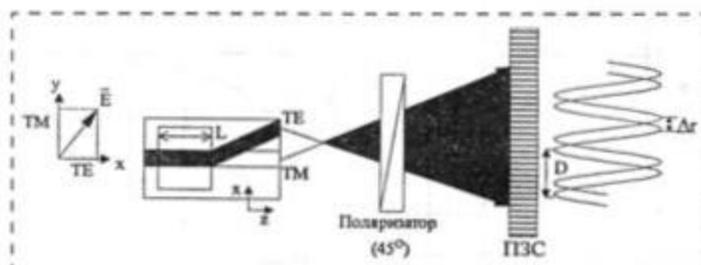


Рис. 1. Схема микроволнового поляризационного рефрактометра:

L — длина рабочей области; Δr , D — смещение и период интерференционных полос соответственно

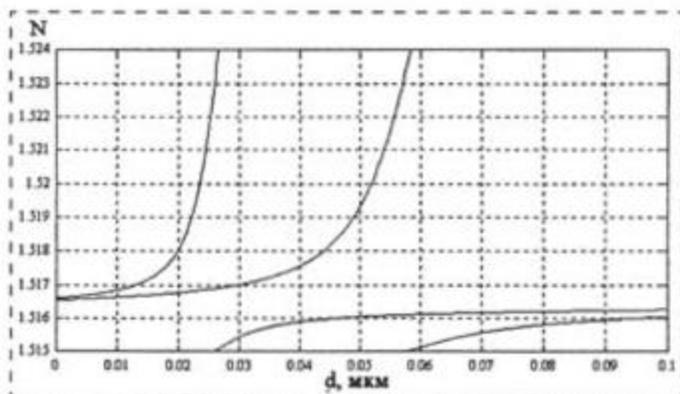


Рис. 2. Зависимость эффективного показателя преломления N от толщины высокопреломляющей пленки d четырехслойного волновода

Рассчитаны поляризационные характеристики четырехслойного волновода, состоящего из одномодового канального или планарного слабонаправляющего волновода, покрытого высокопреломляющей диэлектрической пленкой (рис. 2). На основе сопоставления дисперсионных кривых ТЕ- и ТМ-мод и значений их толщины отсечки можно сделать следующие выводы:

- толщина отсечки для зарождающихся ТЕ- и ТМ-мод четырехслойного волновода существенно различна;
- в области, примыкающей к точке отсечки (для моды следующего порядка), различие эффективных показателей преломления ТЕ- и ТМ-мод N_{TE} и N_{TM} достигает значения $\sim 0,003$. Аналогичное различие периодически повторяется по мере возникновения новых мод более высоких порядков.

Таким образом, вблизи отсечки эффективная толщина волноводных мод быстро меняется в зависимости от параметров волновода. Различию констант распространения будет соответствовать

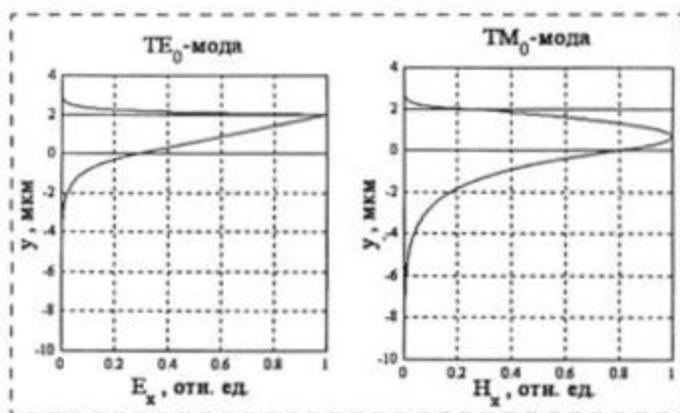


Рис. 3. Распределение полей ТЕ₀- и ТМ₀-моды по глубине в волноводной структуре датчика

существенная разница в распределениях полей ТЕ- и ТМ-мод (рис. 3).

В основе предлагаемого метода разнесения полей ТЕ- и ТМ-волн по разным каналам лежит известный принцип модовой селекции в асимметричном Y-разветвителе. Однако необходимое модовое двупреломление с учетом особенностей рассмотренного выше поляризационного эффекта можно организовать путем подбора параметров волноводов на основе диэлектрических изотропных слоев.

Расщепитель представляет собой асимметричный Y-разветвитель на основе канальных волноводов в стекле (см. рис. 1). Часть поверхности расщепителя покрывается высокопреломляющей пленкой подобранной толщины для формирования области с резко различными константами распространения для обеих поляризаций. В целом предложенная структура должна обладать свойствами адиабатического перехода, т. е. мощность, введенная в одну из локальных собственных мод, должна переноситься в ней на протяжении всего перехода.

Для подтверждения предлагаемого способа разделения поляризаций и в целях определения параметров расщепителя теоретический анализ проводился с использованием метода распространяющегося пучка. Для большей наглядности был использован метод эффективного показателя преломления для сведения трехмерной задачи к двумерной. При использовании метода эффективного показателя преломления исследуемая волноводная структура на основе канального волновода представляется в виде суперпозиции двух планарных волноводов. На рис. 4 и 5 показано распространение направленных ТЕ- и ТМ-волн в расщепителе на распространение 200 мкм. Эффективность развязки между каналами (определяемая по отношению мощностей в каждом из каналов) составляет 28 дБ для ТЕ-поляризационных волн и 25 дБ для

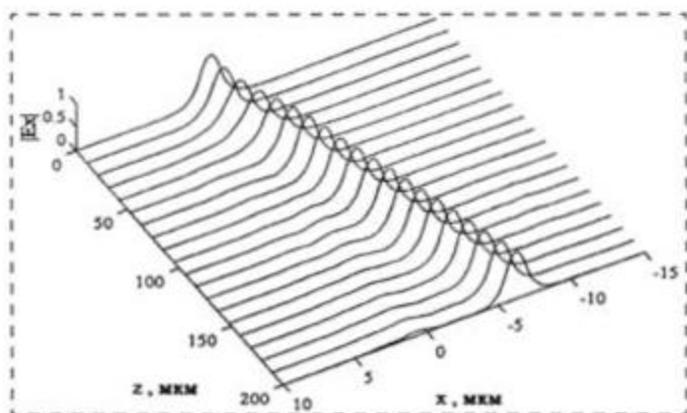


Рис. 4. Картина распространения ТЕ-волн в волноводном пространственном разделителе поляризаций

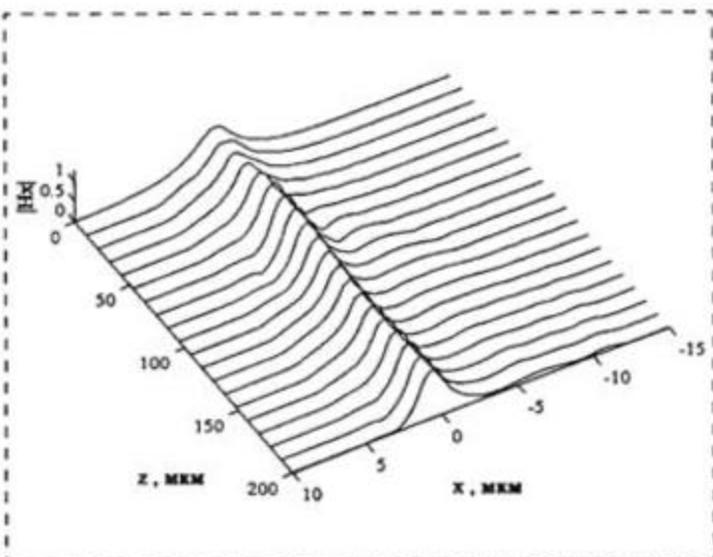


Рис. 5. Картина распространения ТМ-волн в волноводном пространственном разделителе поляризаций

ТМ-поляризованных волн; вносимые потери для обеих поляризаций не превышают 0,05 дБ.

Согласно классической теории поляриметрии, сдвиг фаз ортогонально поляризованных волн $\Delta\phi$, вызванный вариацией показателя преломления покровного слоя, вычисляется по формуле

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda) L(\Delta N_{TE} - \Delta N_{TM}), \quad (1)$$

где L — длина волновода; ΔN_{TE} , ΔN_{TM} — изменение эффективного показателя преломления фундаментальных TE_0 - и TM_0 -мод соответственно; λ — длина волны излучения в вакууме. Сдвиг фазы связан со смещением интерференционной картины:

$$\Delta\phi = 2\pi\Delta r/D, \quad (2)$$

где Δr — смещение полос; D — их период.

Расчет показывает, что чувствительность датчика может достигать $1 \cdot 10^{-6}$, это соответствует сдвигу

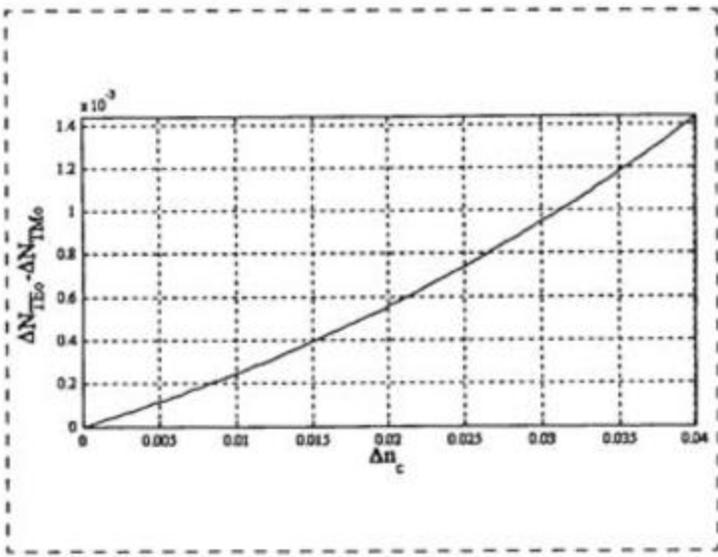


Рис. 6. Зависимость модового двулучепреломления ($\Delta N_{TE_0} - \Delta N_{TM_0}$) от вариации показателя преломления покровной среды ($\Delta n_c = n_c - 1,33$) в диапазоне его изменения 1,33+1,37

гу фаз ортогональных мод $0,7^\circ$ при длине всего устройства 10 мм (рабочая длина волны 0,63 мкм). Важным результатом расчета оказалась линейная зависимость модового двулучепреломления и, следовательно, сдвига фаз от показателя преломления покровного слоя, полученная для диапазона показателя преломления 1,33+1,37 (рис. 6).

Таким образом, предложен высокочувствительный рефрактометр поляриметрического типа для анализа химико-биологических реагентов, использующий модовое двулучепреломление четырехслойной волноводной структуры.

Список литературы

1. Векшин М. М., Никитин В. А., Яковенко Н. А. Поляризационные свойства четырехслойного диэлектрического волновода // Письма в ЖТФ. 1998. 24. № 6. С. 35–39.
2. Векшин М. М., Гладкий В. П., Никитин В. А., Яковенко Н. А. Интегрально-оптические поляризаторы на основе многослойных волноводов // Автометрия. 1998. № 5. С. 58–65.

М. А. Королев, д-р техн. наук, проф.,
Ю. А. Чаплыгин, д-р техн. наук, проф.,
 Московский государственный институт электронной техники,
Р. Д. Тихонов, канд. техн. наук,
 Научно-производственный комплекс "Технологический центр" МИЭТ

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ МИКРОСИСТЕМЫ — ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Конструктивно-технологический потенциал микроэлектроники позволяет создавать микросистемы существенно меньших размеров, с новыми уникальными параметрами и, что особенно важно, в виде единой интегральной схемы, что уменьшает их стоимость. Интеллектуальный силовой ключ состоит из сенсорных устройств на входе и исполнительных устройств на выходе, что повышает функциональную надежность полупроводниковых силовых ключей. Показана принципиальная возможность создания микросистемы интеллектуальных силовых ключей по КМОП-технологии.

Микроэлектроника и микро-технология в последние десятилетия определяли и определяют уровень развития технических средств информатики, вычислительной техники, систем автоматизации и телекоммуникации, в значительной степени способствующих укреплению экономического потенциала государства и его обороноспособности. Хотя в настоящее время элементная база и технология микроэлектронных изделий достаточно отработаны и используются при создании устройств широкого применения, однако возрастающие требования к параметрам аппаратуры требуют непрерывно совершенствоваться как элементную базу микроэлектроники, так и технологические процессы.

Дальнейшее развитие микроэлектроники привело к новому направлению — созданию микросистем [1]. Если традиционная интегральная схема обычно выполняет лишь функции преобразования или хранения электрического сигнала (информации), то микросистема обладает более расширенными возможностями, так как включает в себя не только элементы преобразования электрического сигнала, но и например, сенсорные устройства на входе и исполнительные устройства на выходе. Такие системы в

макроисполнении давно применяются в технике в виде набора дискретных приборов и устройств. Использование конструктивно-технологического потенциала микроэлектроники позволяет создавать микросистемы существенно меньших размеров, с новыми уникальными параметрами и, что особенно важно, в виде единой интегральной схемы (гибридной или монолитной), тем самым увеличивая ее надежность и снижая стоимость производства. Поэтому создание конструктивно-технологических принципов и разработка конкретных новых маршрутов или процессов изготовления таких интегрированных микросистем актуально для развития современной электроники.

Одним из примеров интегрированных микросистем являются "интеллектуальные" силовые интегральные схемы (Smart Power) — монолитные ИС, содержащие на одном кристалле как мощные элементы, так и интеллектуальные компоненты: схемы управления и самозащиты мощных приборов, включающие в себя датчики вектора магнитного поля, температуры, силы тока и других параметров. "Интеллект" ИС позволяет помимо реализации функции управления мощным прибором (сдвиг логического уровня для согласования с маломощными

приборами, сдвиг верхнего и нижнего уровней для подключения мощных приборов в полумостовые, мостовые и трехфазные мостовые схемы, подкачка заряда и пр.) осуществлять эффективную защиту мощного прибора от "нештатной" ситуации при функционировании. Такая сложнотехнологическая интегральная схема, содержащая на одном кристалле датчики, преобразователи, усилители, компараторы, буферные устройства и управляемые мощные выходные устройства, по существу представляет собой интегрированную микросхему, относящуюся к новому классу перспективных изделий микро-системной техники.

Интегрированные микросистемы типа Smart Power находят широкое применение в системах автоматизации и управления промышленной и бытовой электроники [2]. Однако при создании таких полупроводниковых приборов возникает ряд проблем, в частности, необходимость совмещения технологий мощных и маломощных элементов схемы и обеспечения удовлетворительной изоляции между ними. Мощные элементы, как правило, — вертикальные ДМОП-транзисторы, а интеллектуальная часть схемы выполняется на основе планарных КМОП-структур. Такая конструкция микросистемы требует применения смешанной технологии, что значительно удорожает изделие, а то, что стоком вертикального ДМОП-транзистора является подложка, приводит к существенному влиянию мощных элементов на функционирование маломощных элементов. Поэтому в настоящее время основные усилия разработчиков сосредоточены в направлении создания мощного МОП-транзистора планарной конструкции. В этом случае обеспечивается изоляция между компонентами схемы и можно использовать единый технологический маршрут.

Особенностью работы силовых ключей является большое разнообразие условий на нагруз-

ке — от короткого замыкания до всплесков напряжения, превышающих напряжение питания при индуктивной нагрузке. Поэтому необходимо обеспечивать функциональную надежность полупроводниковых силовых ключей, которая определяется степенью защищенности их от перегрузок по току, напряжению и перегреву. В работах [3—11] рассматривается возможность одновременного изготовления на одном кристалле силовых ключей на основе планарных МОП-транзисторов и КМОП-схем защиты, управления и предложен ряд конструктивно-технологических решений, позволяющих решить эту проблему. Показаны принципиальная возможность создания интеллектуальных силовых ключей по КМОП-технологии и преимущества такого направления для развития полупроводниковой силовой электроники.

С использованием приборно-технологической САПР ISE TCAD было проведено моделирование силовых планарных МОП-транзисторов и определены их конструктивно-технологические параметры и электрические характеристики [5—10]. На основе результатов моделирования и экспериментальных исследований была разработана и изготовлена по базовой КМОП-технологии монолитная ИС интеллектуального силового ключа — интегрированная микросистема. Эта система состоит из силового планарного МОП-транзистора, диодного датчика температуры, резисторного датчика перегрузки по току схемы, стабилитрона на входе схемы для обеспечения согласования уровней входного сигнала с напряжением управления силовым ключом, диодов, защищающих от воздействия электростатического электричества на входе и от перегрузки напряжения на выходе, компараторов уровня, логической схемы ИЛИ, которая выдает сигнал управления ключом.

Основную часть площади кристалла (рис. 1, см. вторую сторо-

ну обложки) занимает силовой ключ, а вся остальная часть схемы размещается вблизи контактной площадки на достаточном удалении от силовой части для исключения влияния силового ключа на схемы датчиков.

Исследование параметров интегрированной микросистемы в диапазоне температуры от -60 до 150 °С показало, что при температуре 120 °С срабатывает схема защиты от перегрева и ключ закрывается. Такой же эффект наблюдается и при токе нагрузки $1,5$ А (рис. 2, см. вторую сторону обложки). При комнатной температуре отношение сопротивления закрытого ключа к сопротивлению открытого составляет 10^{11} , при 120 °С — более $6 \cdot 10^9$, что является очень хорошими показателями для мощных ключевых схем. Силовые ключи имеют пробивное напряжение 100 В, сопротивление открытого МОП-транзистора $0,5$ Ом, рабочую частоту $0,5$ МГц, что позволяет использовать эти транзисторы во многих применениях интеллектуальных силовых ключей.

Изготовленные экспериментальные образцы планарных силовых МОП-транзисторов с оптимальной структурой по измеренным параметрам удовлетворительно соответствуют расчетным. Результаты измерений показывают, что выбранная конструкция и отработанная технология обеспечивают воспроизводимое получение параметров интеллектуальных силовых КМОП-ключей с КМОП-схемами управления и защиты.

На рис. 2 (см. вторую сторону обложки) приведены характеристики переключения ключей микросхемы при напряжении питания на выходе 16 В и различных значениях тока нагрузки: $0,1$; $0,3$; $0,5$; $0,7$; $0,9$; $1,2$; $1,5$ А. Схема обратной связи реагирует на значение тока, при достижении тока нагрузки $1,5$ А включается схема защиты и ключ закрывается.

Таким образом разработанные конструктивно-технологические

решения позволяют создавать интегрированные микросистемы — интеллектуальные силовые ключи, что показывает плодотворность этого нового направления науки и техники.

Список литературы

1. Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—6.
2. Baliga V. J. An overview of smart power technology // IEEE Trans. Electron Devices. 1991. Vol. 38. N 7. P. 1568—1575.
3. Королев М. А., Чаплыгин Ю. А., Тихонов Р. Д. Интегрированные микросистемы — перспективные элементы микросистемной техники // Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции МИЭТ "Электроника и информатика — 2002". Часть 2. Москва, 19—21 ноября 2002 г. С. 39, 40.
4. Королев М. А. Интеллектуальные силовые ИС — интегрированные микросистемы // Изв. вузов. Электроника. 2001. № 5. С. 11—12.
5. Миргородский Ю. Н., Тихонов Р. Д., Матвеев Д. А. Оптимизация технологического маршрута изготовления мощного МОП-транзистора с помощью методов математического моделирования // Тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции "Электроника и информатика—97". Москва, МИЭТ. 1997. С. 180—181.
6. Королев М. А., Тихонов Р. Д., Швецов А. В. Исследование влияния способов формирования локального окисла на параметры мощных МОП-транзисторов в "интеллектуальных" силовых интегральных схемах // Изв. вузов. Электроника. 2001. № 1. С. 29—35.
7. Королев М. А., Тихонов Р. Д., Швецов А. В. Исследование влияния структуры пинч-резисторного пассивного канала на параметры МОП-транзисторов интеллектуальных силовых интегральных схем // Изв. вузов. Электроника. 2001. № 3. С. 91—92.
8. Королев М. А., Тихонов Р. Д., Швецов А. В. Исследование влияния длины затвора над активным и пассивным каналами на параметры мощных МОП-транзисторов // Изв. вузов. Электроника. 2001. № 5. С. 54—58.
9. Королев М. А., Тихонов Р. Д. Планарные МОП-транзисторы для силовых интеллектуальных ключей // Тезисы докладов научно-технической конференции "Микро- и нанозлектроника 2001" (МНЭ—2001). Звенигород, октябрь 2001. С. P1—8.
10. Королев М. А., Тихонов Р. Д. Интеллектуальный силовой ключ на основе базовой КМОП-технологии // Тезисы докладов научно-технической конференции "Микро- и нанозлектроника 2001" (МНЭ—2001). Звенигород, 2001. С. P3—8.
11. Тихонов Р. Д. Технология интеллектуальных силовых ключей на КМОП-базисе // Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции МИЭТ "Электроника и информатика—2002". Часть 1. Москва, 19—21 ноября 2002 г. С. 130, 131.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 537.533.2, 537.533.8

К. Н. Никольский,
А. С. Батурич, канд. физ.-мат. наук,
А. С. Купряшкин, Р. Г. Чёсов,
Е. П. Шешин, д-р физ.-мат. наук, проф.,
 Московский физико-технический институт
 (государственный университет)

"ЭФФЕКТ КОЛЬЦА" ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Исследованиями импульсной автоэлектронной эмиссии в электронном проекторе было установлено, что при приближении к предельно высоким плотностям тока происходит характерное изменение эмиссионной картины, состоящее в появлении яркого кольца, окружающего обычное эмиссионное изображение. При исследованиях плоских автоэмиссионных катодов неоднократно было замечено появление колец. Для объяснения "эффекта кольца" была предложена модель, в основе которой лежит предположение о том, что вторичные электроны, эмитируемые с анода, под действием электрического поля возвращаются на анод, образуя наблюдаемое кольцо.

Введение

При изучении автоэмиссионных свойств плоских катодов, в частности, катодов на основе графитовых порошков и катодов, изготовленных методом газозащитного осаждения, мы неоднократно сталкивались с появлением ярких светящихся колец на эмиссионном изображении. Кольца представляют собой диффузно-засвеченную область люминофора, окружающую основное автоэлектронное изображение. Диаметр колец часто превосходит размер основного изображения. Яркость колец увеличивается при увеличении эмиссионного тока.

Исследованиями импульсной автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) в электронном проекторе [1–5] было однозначно установлено, что при приближении к предельно высоким плотностям тока происходит характерное изменение эмиссионной картины, состоящее в появлении яркого кольца, окружающего обычное эмиссионное изображение. Впервые этот эффект был описан в работе [1]. Кольцо наблюдали при изучении эмиссии с вольфрамового острия, когда плотности токов приближались к критическим значениям. Одновременно с появлением кольца происходил скачок эмиссионного тока. Ав-

торы объяснили данный эффект термоавтоэлектронной эмиссией. Катод разогревается автоэлектронным током, что, в свою очередь, усиливает сам ток. В работах [2–5] изучались явления, возникающие на остриях из различных материалов, предшествующие разряду, т. е. аномальное увеличение эмиссионного тока и "эффект кольца". При определенных условиях наблюдалось несколько концентрических колец. Преддуговым явлениям авторы приписали тепловой характер, объяснив это их инерционностью и зависимостью от времени протекания автоэлектронного тока. Но окончательно объяснения природы колец в этих работах так и не было сделано, что обусловлено недостатком экспериментальных данных на тот период времени. Поэтому было высказано несколько гипотез образования колец:

- а) термоавтоэлектронная эмиссия с периферийного участка острия;
- б) выступы на поверхности эмиттера;
- в) дифракция электронов.

Из представленных гипотез основной и наиболее подтвержденной экспериментально является гипотеза а). Однако ее основным недостатком является невозможность объяснения увеличения тока в кольце за время импульса на 2–3 порядка, в то время как температурная добавка к току АЭЭ в пределах применимости уравнения Фаулера—Нордгейма составляет всего несколько десятков процентов.

В работе [6] проведено моделирование и показано, что образование кольца может быть объяснено автотермоэлектронной эмиссией с периферийной части острия. Однако авторы [6] подчеркивают, что такая модель не в состоянии объяснить появление нескольких колец на эмиссионном изображении.

Модель образования колец в случае плоской геометрии анод—катод

В экспериментах, описанных в работах [1–5], кольца появлялись в предпробойный период. Их возникновение сопровождалось самопроизвольным нарастанием тока, приводящим к пробое и гибели катода. В наших экспериментах, в отличие от [1–5], кольца существовали длительное время, и их появление не было связано с гибелью эмиссионного центра. Например, на рис. 1, а (см. третью сторону обложки) показан момент зарождения кольца. Дальнейшее увеличение тока в 4 раза привело к существенному увеличению интенсивности

кольца без разрушения катода (рис. 1, б, см. третью сторону обложки).

Таким образом, наблюдаемые нами кольца нельзя отнести к предпробойному режиму, исследованному в [1–5]. В конструкциях с плоским автоэмиссионным катодом более реалистичным представляется следующий механизм возникновения колец. Электроны, попадая на анод, выбивают с его поверхности вторичные электроны, которые под действием электрического поля возвращаются на анод и образуют кольцо.

Рассмотрим модель плоского диода с расстоянием между анодом и катодом L (рис. 2, см. третью сторону обложки). При напряжении на аноде, равном U , напряженность поля в промежутке анод–катод равно $E = U/L$. При рассмотрении движения вторичных электронов вблизи анода мы пренебрежем существованием на катоде эмиссионных центров. Они вызывают локальное усиление поля вблизи катода, но не влияют существенным образом на поведение электронов вблизи анода. Рассмотрим движение вторичного электрона, имеющего начальную энергию ϵ_S и вылетающего под углом α с поверхности анода.

Простые вычисления траектории движения электрона в однородном постоянном электрическом поле позволяют найти удаление от точки вторичной эмиссии в плоскости анода

$$r = 2 \frac{\epsilon_S}{eU} L \sin 2\alpha, \quad (1)$$

при этом максимальное удаление от анода составляет

$$h = \frac{\epsilon_S}{eU} L (\sin \alpha)^2. \quad (2)$$

Таким образом, для внешнего радиуса кольца, образованного электронами с начальной энергией ϵ_S , получим выражение

$$r_{\max} = 2L \frac{\epsilon_S}{eU}. \quad (3)$$

Предполагая, что основную роль играют упруго отраженные электроны (они, в частности, дадут кольцо максимального размера), можно считать $\epsilon_S/eU \approx 1$. Следовательно, максимальный диаметр кольца равен $D_{\max} \approx 4L$.

Таким образом, диаметр кольца определяется лишь расстоянием между катодом и анодом и не зависит от тока катода и напряжения анод–катод. Поскольку упруго отраженные электроны составляют лишь часть от всех вторичных электронов, выбиваемых с анода, а также с учетом того, что электроны вылетают с поверхности под различными углами, вся область от внешней границы коль-

ца до эмиссионного изображения эмиттера будет "засвечена".

Экспериментальные данные

Для проверки описанной модели был проведен эксперимент по наблюдению "колец" в плоских диодных конструкциях при различных расстояниях анод–катод. Расстояние регулировалось с помощью стеклянных спейсеров различной толщины: 200, 400 и 600 мкм. В качестве анода выступала стеклянная пластина с прозрачным проводящим покрытием и слоем люминофора.

На рис. 3 (см. третью сторону обложки) приведено изображение, полученное на люминесцентном экране при расстоянии анод–катод 200 мкм. Хорошо видно, что существует несколько ярких колец, каждое из которых образовалось вокруг индивидуального эмиссионного центра. Также нетрудно заметить, что все кольца — одного диаметра, хотя, сравнивая интенсивность колец, можно заключить, что их вклад в общий эмиссионный ток различен. Таким образом, эмиссионный ток не влияет на размер кольца.

Зависимость диаметра колец от расстояния анод–катод хорошо видна на рис. 4 (см. третью сторону обложки). Она описывается формулой (3). Изменение рабочего напряжения при постоянном расстоянии анод–катод на размер кольца не сказывается. Таким образом, можно заключить, что основной механизм образования кольца состоит в упругом отражении электронов от поверхности анода.

Для определения критической плотности тока, при которой происходит возникновение кольца, был изготовлен диод с катодом диаметром ~ 150 мкм, т. е. заведомо меньше размера кольца при расстоянии анод–катод 600 мкм. Измеряя полный ток для такого катода, легко установить критическую плотность тока, при которой происходит зажигание кольца. Для сохранения плоской геометрии катод размещался в центре металлической пластины, плоскость которой была параллельна плоскости анода.

Было установлено, что кольцо начинает зарождаться при плотности тока в первичном пятне $\sim 10^{-3}$ А/см². Диаметр кольца, наблюдаемого в этом случае, также не зависел ни от тока катода, ни от напряжения анод–катод и определялся выражением (3).

Эффект образования кольца, описываемый в работах [1–5], наблюдался в случае сферической геометрии. Анод представлял собой сферическую колбу, покрытую проводящим слоем и люминофором, в роли эмиттера выступало острие, расположенное в центре сферы. Проведенные расчеты, аналогичные (1)–(3), показали, что радиус кольца, которое должно было бы образовываться, в соответствии с приведенной теорией приблизительно

равнялся бы диаметру колбы. Из этого следует, что эффект, который наблюдался при низких плотностях тока в условиях эксперимента, описанного в работах [1—5], увидеть принципиально невозможно.

Заключение

В данной статье представлена модель образования колец, отличная от ранее описанных в литературе [1—6], для объяснения их появления на автоэмиссионном изображении. Приведенная модель относится к процессам, происходящим на аноде, и поэтому может наблюдаться и наблюдается в приборах с термокатодами. Установлено, что диаметр колец зависит только от расстояния анод—катод, а интенсивность кольца определяется плотностью первичного тока и коэффициентом отражения электронов от материала покрытия анода.

Рассмотренный эффект может найти практическое применение при создании приборов, требующих равномерной засветки экрана, в частности, для источников света.

Список литературы

1. Dyke W. P., Trofan J. K., Martin E. E., Barbour J. P. // Phys. Rev. 1953. V. 91. N 5. P. 1043—1053.
2. Сокольская И. Л., Фурсей Г. Н. // РиЭ. 1962. Т. 7. № 9. С. 1474—1483.
3. Сокольская И. Л., Фурсей Г. Н. // РиЭ. 1962. Т. 7. № 9. С. 1484—1494.
4. Фурсей Г. Н., Толкачева И. Д. // РиЭ. 1963. Т. 8. № 7. С. 1210—1221.
5. Фурсей Г. Н. // ЖТФ. 1964. Т. 34. Вып. 7. № 9. С. 1310—1315.
6. Батраков А. В., Проскуровский Д. И. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 11. С. 57.

УДК 546.28:621.3.049.77.002

П. Г. Михайлов, канд. техн. наук,
Пензенский государственный университет

ФОРМООБРАЗУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ СОЗДАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Проанализированы существующие формообразующие технологии для создания объемных структур микрорезистивных датчиков (МЭД). Предложена методика анализа формообразования микромеханических структур с учетом анизотропии исходного материала и свойств травителя. Разработана программа синтеза мезоструктур, позволяющая наблюдать за динамикой процесса формообразования.

Формообразующие технологические процессы, используемые при создании микромеханических устройств (ММУ) и систем, являются наиболее важными в общей технологической цепочке. Так, качество изготовления профилированных чувствительных элементов (ЧЭ), металлопленочных, емкостных и, в наибольшей степени, кремниевых, определяет основные метрологические характеристики датчиков: чувствительность, точность, диапазон измерения, временную и параметрическую стабильность. Особенно это актуально для предназначенных для измерения малых давлений миниатюрных МЭД, у которых толщина перемычек у балок, мембран составляет десятки и единицы микрометров. Кроме того, данная проблема качественного профилирования актуальна при изготовлении рентгеншаблонов, а также для других областей и изделий (изготовление микроклапанов, микродви-

гателей, кантеливеров для атомных силовых микроскопов и пр.).

Анализ и исследование формообразующих технологий

На этапах изготовления сенсорных элементов (СЭ) МЭД методы локального формообразования позволяют получать внешние и внутренние размеры ЧЭ с высокой точностью:

- создавать 3-мерную конфигурацию СЭ;
- формировать элементы жесткости, концентраторы механических напряжений, консоли и пр.

При выборе методов формообразования необходимо исходить из требований, диктуемых, с одной стороны, размерами, конфигурацией и материалами СЭ и ЧЭ МЭД, а с другой стороны, технологической сложностью, экологической безопасностью и т. д. Из всех известных методов формообразования, используемых при изготовлении МЭД, можно выделить следующие:

- электроискровой;
- электрохимический;
- термическое напыление;
- механическое фрезерование;
- изотропное травление;
- анизотропное травление.

Кратко рассмотрим возможности, достоинства, недостатки некоторых из них для определения базовых методов.

Электроискровой метод формообразования. Он исторически был первым методом, которым пытались получить кремниевые ЧЭ в виде тонких профилированных мембран, балочек, отдельных тензорезисторов. Первые советские СЭ на основе

равнялся бы диаметру колбы. Из этого следует, что эффект, который наблюдался при низких плотностях тока в условиях эксперимента, описанного в работах [1—5], увидеть принципиально невозможно.

Заключение

В данной статье представлена модель образования колец, отличная от ранее описанных в литературе [1—6], для объяснения их появления на автоэмиссионном изображении. Приведенная модель относится к процессам, происходящим на аноде, и поэтому может наблюдаться и наблюдается в приборах с термокатадами. Установлено, что диаметр колец зависит только от расстояния анод—катод, а интенсивность кольца определяется плотностью первичного тока и коэффициентом отражения электронов от материала покрытия анода.

Рассмотренный эффект может найти практическое применение при создании приборов, требующих равномерной засветки экрана, в частности, для источников света.

Список литературы

1. Dyke W. P., Trofan J. K., Martin E. E., Barbour J. P. // Phys. Rev. 1953. V. 91. N 5. P. 1043—1053.
2. Сокольская И. Л., Фурсей Г. Н. // РиЭ. 1962. Т. 7. № 9. С. 1474—1483.
3. Сокольская И. Л., Фурсей Г. Н. // РиЭ. 1962. Т. 7. № 9. С. 1484—1494.
4. Фурсей Г. Н., Толкачева И. Д. // РиЭ. 1963. Т. 8. № 7. С. 1210—1221.
5. Фурсей Г. Н. // ЖТФ. 1964. Т. 34. Вып. 7. № 9. С. 1310—1315.
6. Батраков А. В., Проскуровский Д. И. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 11. С. 57.

УДК 546.28:621.3.049.77.002

П. Г. Михайлов, канд. техн. наук,
Пензенский государственный университет

ФОРМООБРАЗУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ СОЗДАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Проанализированы существующие формообразующие технологии для создания объемных структур микрорезистивных датчиков (МЭД). Предложена методика анализа формообразования микромеханических структур с учетом анизотропии исходного материала и свойств травителя. Разработана программа синтеза мезоструктур, позволяющая наблюдать за динамикой процесса формообразования.

Формообразующие технологические процессы, используемые при создании микромеханических устройств (ММУ) и систем, являются наиболее важными в общей технологической цепочке. Так, качество изготовления профилированных чувствительных элементов (ЧЭ), металлопленочных, емкостных и, в наибольшей степени, кремниевых, определяет основные метрологические характеристики датчиков: чувствительность, точность, диапазон измерения, временную и параметрическую стабильность. Особенно это актуально для предназначенных для измерения малых давлений миниатюрных МЭД, у которых толщина перемычек у балок, мембран составляет десятки и единицы микрометров. Кроме того, данная проблема качественного профилирования актуальна при изготовлении рентгеншаблонов, а также для других областей и изделий (изготовление микроклапанов, микродви-

гателей, кантеливеров для атомных силовых микроскопов и пр.).

Анализ и исследование формообразующих технологий

На этапах изготовления сенсорных элементов (СЭ) МЭД методы локального формообразования позволяют получать внешние и внутренние размеры ЧЭ с высокой точностью:

- создавать 3-мерную конфигурацию СЭ;
- формировать элементы жесткости, концентраторы механических напряжений, консоли и пр.

При выборе методов формообразования необходимо исходить из требований, диктуемых, с одной стороны, размерами, конфигурацией и материалами СЭ и ЧЭ МЭД, а с другой стороны, технологической сложностью, экологической безопасностью и т. д. Из всех известных методов формообразования, используемых при изготовлении МЭД, можно выделить следующие:

- электроискровой;
- электрохимический;
- термическое напыление;
- механическое фрезерование;
- изотропное травление;
- анизотропное травление.

Кратко рассмотрим возможности, достоинства, недостатки некоторых из них для определения базовых методов.

Электроискровой метод формообразования. Он исторически был первым методом, которым пытались получить кремниевые ЧЭ в виде тонких профилированных мембран, балочек, отдельных тензорезисторов. Первые советские СЭ на основе

кремния были получены электроискровым методом в Московском ГИРЕДМЕТе (плоские и чашечные мембраны) и в Новосибирском электротехническом институте (полупроводниковый терморезистор "НЭТИСТОР").

Идея метода была заимствована из приборостроения, где электроискровая обработка уже давно использовалась при изготовлении прецизионных металлических малогабаритных деталей. Хотя кремний имеет гораздо меньшую проводимость, чем металл, но искрообразование и, соответственно удаление его, также происходят, но с меньшей, чем у металла, скоростью.

Формообразование внутренних полостей в ЧЭ требует более длительного времени, чем просто резка пластины на кристаллы. При этом качество формообразования внутренних полостей вследствие слабой управляемости процесса электроэрозии весьма низкое, а механическая прочность ЧЭ значительно снижена за счет образования сетки приповерхностных микротрещин неконтролируемого размера. Кроме того, сам процесс электроискрового фрезерования кремния, в отличие от металла, проводится на воздухе, что вызывает осаждение на поверхности ЧЭ различного рода оксидов, нитридов, боридов, являющихся продуктами реакции паров кремния (кремний является активным материалом) с газами воздуха. В результате этого образуются слабо растворимые пленки, которые препятствуют улучшению качества поверхности путем дополнительного травления.

В дальнейшем от электроискрового метода формирования внутренних полостей и элементов отказались, его используют исключительно для получения кристаллов круглой формы с достаточной для практики точностью. Одно из достоинств данного метода — отсутствие анизотропии при разделении пластин на кристаллы, что позволяет, при необходимости, получать различные наружные формы ЧЭ. Общий недостаток метода — наличие зоны "пригара" в виде кольца, заходящего вглубь от границы реза на 20...40 мкм в зависимости от технологических режимов. Указанная зона "пригара" не позволяет в дальнейшем соединять такие кристаллы электроадгезионным методом. Попытки удаления пригара какими-либо химическими методами не приносят положительных результатов. Поэтому кристаллы ЧЭ, разделенные электроискровым методом, в дальнейшем могут быть установлены на сочленяемую деталь только с помощью клея или ситаллоцемента.

Следует отметить, что электроискровой метод целесообразно использовать в комбинации с другими методами формообразования, например с изотропным и анизотропным травлением. При этом для формирования мезаструктур, отверстий и перемычек используется жидкостное травление, а

для получения наружной формы кристаллов применяют электроискровой метод [1].

Формообразование с помощью изотропного и анизотропного травления. Математическая модель процесса травления в общем виде может быть представлена так:

$$U_{\text{тр}} = \frac{k_{\text{диф}} k e^{-E/kT}}{k_{\text{диф}} + k e^{-E/kT}} C, \quad (1)$$

где $U_{\text{тр}}$ — скорость травления; k — константа скорости химической реакции; E — энергия активации реакции травления; $k_{\text{диф}}$ — коэффициент пропорциональности диффузионного процесса; C — концентрация травителя.

В зависимости от лимитирующей стадии в процессе травления (химические реакции на поверхности, диффузия реагентов в поверхностный слой, адсорбция реагентов, десорбция продуктов реакции) имеют место два случая, которые следуют из формулы (1):

1) $k_{\text{диф}} \ll e^{-E/kT}$, тогда $U_{\text{тр}} = k_{\text{диф}} C$, травление в данном случае является полирующим и не зависит от энергии активации E ;

2) $k_{\text{диф}} \gg e^{-E/kT}$, т. е. $U_{\text{тр}} = k_{\text{диф}} C e^{-E/kT}$, в этом случае $U_{\text{тр}}$ существенно зависит от E .

В свою очередь, энергия активации реакции травления зависит от кристаллографической ориентации поверхности и характер травления будет *анизотропным*, т. е. $U_{\text{тр}}$ будет не скаляром, как в первом случае, а вектором.

В первом случае характер травления является *изотропным*, фронт травления при этом будет равномерным и избирательность травления будет отсутствовать.

Во втором же случае при анизотропном травлении Si в растворе едкого калия (КОН) большое значение имеет выбор технологических режимов травления и материала маскирующего покрытия.

Термины "анизотропное травление", "анизотропный травитель" означают, что имеет место эффект доминирования процесса удаления в определенном известном направлении по отношению к другим ориентациям. Так как скорость вообще и скорость травления материала, в частности, суть векторная величина, то наглядно ее можно изобразить в координатах X, Y, Z так, как показано на рис. 1, где в общем виде представлена конфигурация полей травления (1 — основной "лепесток" вектора $\vec{V}_{\text{тр}}$; 2 и 3 — боковые "лепестки").

При проектировании вектора $\vec{V}_{\text{тр}}$ на основные кристаллографические плоскости и направления можно получить более удобные для анализа диаграммы травления (рис. 2), где в качестве примера приведена диаграмма травления кремния в 33 %-ном водном растворе едкого калия КОН [2].

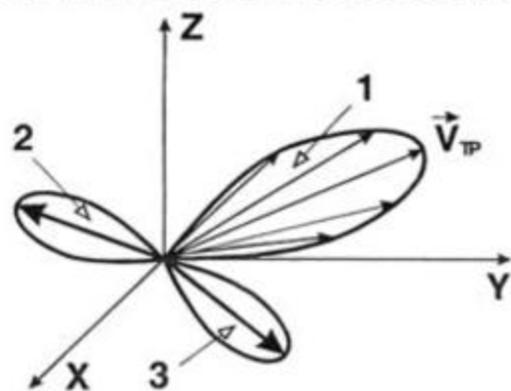


Рис. 1. Векторная диаграмма скорости травления

На рис. 1, 2 видно, что $\vec{V}_{тр}$ имеет максимальное значение в определенных кристаллографических направлениях. В то же время на диаграммах травления (получаемых экспериментально) существуют наряду с основными направлениями (областями) травления еще и дополнительные, которые, хотя и оказывают меньшее влияние на процесс формообразования, но в то же время могут образовывать дополнительные грани и плоскости травления.

Следует отметить, что чем уже область травления (уже "лепесток") и меньше самих областей, тем больше степень анизотропии травления, это позволяет получать более совершенные с точки зрения геометрии конфигурации фигур травления.

При разработке топологии ММУ и конфигурации защитных масок диаграмму направленности и анизотропию вектора травления необходимо учитывать в полной мере.

Анизотропное травление в качестве базовой технологии при формировании СЭ МЭД выбрано по целому ряду причин: перспективность, простота, доступность и др.

В настоящем времени и в обозримом будущем анизотропное жидкостное травление как техноло-

гия формообразования будет занимать ведущее место при изготовлении ММУ и МЭД [3, 4, 5]. Его преимущество по отношению к остальным методам формообразования — в простоте технологического обеспечения, доступности материалов и возможности достижения высокой точности формообразования. Чистота (микропрофиль) формирующих поверхностей может быть достигнута на уровне $0,02 \pm 0,05$ мкм, при этом поверхность гладкая и при оптимальных режимах травления отсутствуют бугорки и ямки, которые ухудшают механические свойства ММУ.

Анизотропное травление в едком калии позволяет получать одновременно и внутреннюю (полости, перемычки, концентраторы), и наружную (столбики, балки, упоры, жесткие центры и т. д.) поверхности ММУ. Управление формообразованием достигается назначением времени травления (предпочтительно), концентрацией и температурой травителя. Как показала практика изготовления ММУ и проведенные исследования, наиболее оптимальными для травителей на основе КОН являются следующие технологические режимы:

- концентрация — 33 %-ный КОН;
- температура 105...107 °С (температура кипения 33 %-ного раствора);
- вертикальное расположение кремниевых пластин в реакторе;
- герметичность реактора в процессе травления.

Качество поверхности травления оценивалось с помощью инструментального микроскопа по измерению резкости выступов и ямок микропрофиля, а также по измерению микрошероховатости на профилографе-профилометре модели 252. Результаты экспериментов приведены на рис. 3, где показана микрошероховатость поверхности мембраны МЭД давления при травлении ее в щелочном водном травителе с разной концентрацией и температурой травления. Травление проводили на глу-

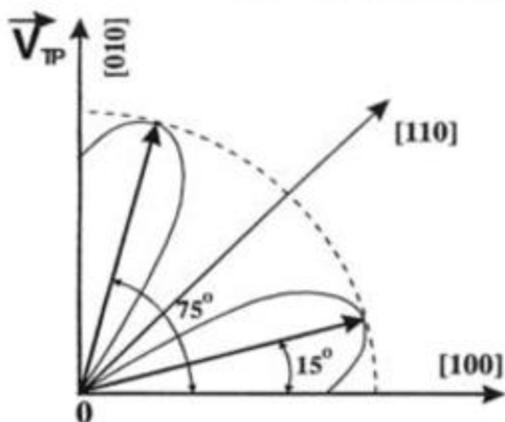


Рис. 2. Диаграмма скорости травления кремния в анизотропном травителе — 33 %-ном водном растворе едкого калия (КОН)

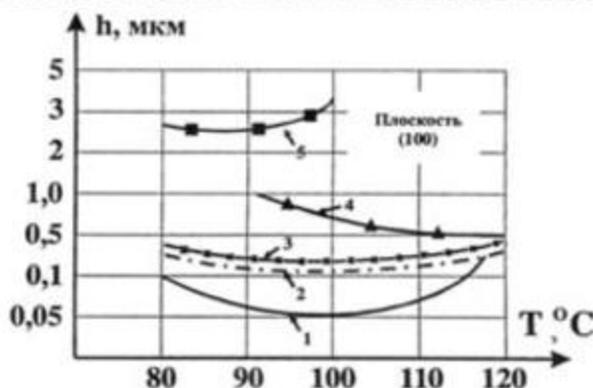


Рис. 3. Зависимость качества травимой поверхности от температуры и состава анизотропного травителя: 1 — 33 %-ный КОН; 2 — 50 %-ный КОН; 3 — 40 %-ный КОН; 4 — 25 %-ный КОН; 5 — 20 %-ный КОН

бину от 20 до 50 мкм пластин из монокристаллического кремния марки КЭФ 4,5 толщиной 300 мкм.

Из последнего рисунка видно, что эксперименты подтвердили оптимальность режимов — температура 100 °С и концентрация 33 % КОН.

На основании полученных результатов была разработана программа, моделирующая процесс получения выпуклых и вогнутых фигур травления произвольной конфигурации при использовании различных травителей и режимов травления. Программа позволяет моделировать анизотропное и изотропное травления с различной точностью (шагом), имитировать динамику процесса, получать необходимые фигуры. Универсальность разработанной программы состоит в возможности моделирования процессов наращивания, удаления и пе-

рераспределения материалов при проведении процессов формирования структур ММУ.

Список литературы

1. Козин С. А., Чистякова Т. Г., Зеленцов Ю. А. Размерное травление кремния при изготовлении интегральных чувствительных элементов преобразователей механических величин // Приборы и системы управления. 1990. № 10. С. 42—43.
2. Ваганов В. И. Интегральные преобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Петерсен К. Э. Кремний как механический материал // ТИИЭР. 1982. Т. 70. № 5. С. 5—7.
4. M. Hirata, K. H. Tanigama Silicon Diaphragm Pressure Sensors fabricated by anodic oxidation etch-stop. Sensors and Actuators. 1988. V. 13. N 1. P. 63—64.
5. Михайлов П. Г., Козин С. А., Зеленцов Ю. А. Способ изготовления чувствительных элементов кремниевых тензопреобразователей. Авт. свид. 1144567 (СССР).

УДК 537.228.1 + 539.219.1

С. В. Глушанин,
В. Ю. Тополов, д-р физ.-мат. наук,
Ростовский государственный университет

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ 1—2-КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СЕГНЕТОПЬЕЗОКЕРАМИКИ

Предложен алгоритм определения эффективных упругих, пьезо- и диэлектрических констант в рамках новой модели 1—2-композиата "сегнетопьезокерамика—полимер". Проанализировано влияние зигзагообразных сегнетопьезокерамических включений на немономонное и знакопеременное поведение различных типов эффективных пьезокоэффициентов, не имеющее аналогов среди известных двухкомпонентных композитов.

Пьезоэлектрические керамики и композиты на их основе составляют важнейшую группу современных функциональных материалов [1—3], применяемых в пьезоэлектрических преобразователях, ультразвуковых, сейсмологических, гидроакустических, медицинских приборах и устройствах. Большой практический и академический интерес к пьезоактивным композитам (ПК) связан с разнообразием их физических свойств, а в ряде случаев и с сильной зависимостью физических свойств от объемных концентраций компонентов и микроstructures ПК [4—8]. Одной из главных характеристик микроstructures является *связность* [7, 8]. Для двухкомпонентных ПК она записывается в виде

$\alpha-\beta$, где целые $\alpha, \beta = 0...3$ определяют число осей прямоугольной системы координат $X_1X_2X_3$, вдоль которых непрерывно распределяются первый (как правило, пьезоактивный) и второй компоненты соответственно.

Несмотря на широкое распространение ПК на основе сегнетопьезокерамики (СПК) лишь примерно для половины связностей $\alpha-\beta$ исследовалась связь микроstructure—свойства ПК. В частности, связность 1—2 и конкретная схема усреднения физических свойств рассматривались в единственной работе [7]. Ранее анализировались структуры различных 1— β - и 2—2-ПК с плоскими границами раздела, ориентированными параллельно [5, 7, 9, 10] или перпендикулярно [6, 7, 10] вектору напряженности поляризующего поля E . И только в недавних работах [11, 12] исследовались электромеханические свойства 1—3-ПК с наклонными СПК стержнями. В настоящей статье мы рассматриваем модель 1—2-ПК "СПК—полимер", содержащую систему зигзагообразных включений, и проводим анализ влияния последних на эффективные электромеханические свойства данного ПК.

В представленной на рис. 1 модели 1—2-ПК СПК пластины, пронизывающие полимерную матрицу вдоль оси OX_3 , повернуты на угол φ по или против часовой стрелки вокруг этой оси, образуя системы зигзагов. СПК пластины являются поляризованными вдоль оси OX_3 , а их объемная концентрация $t = |OA|/|OB| = |LR|/|LP|$ изменяется так, что справедливо неравенство $|KM| < |KN|$. Вследствие последнего неравенства полимерный компонент в интервале MN является непрерывным вдоль осей

бину от 20 до 50 мкм пластин из монокристаллического кремния марки КЭФ 4,5 толщиной 300 мкм.

Из последнего рисунка видно, что эксперименты подтвердили оптимальность режимов — температура 100 °С и концентрация 33 % КОН.

На основании полученных результатов была разработана программа, моделирующая процесс получения выпуклых и вогнутых фигур травления произвольной конфигурации при использовании различных травителей и режимов травления. Программа позволяет моделировать анизотропное и изотропное травления с различной точностью (шагом), имитировать динамику процесса, получать необходимые фигуры. Универсальность разработанной программы состоит в возможности моделирования процессов наращивания, удаления и пе-

рераспределения материалов при проведении процессов формирования структур ММУ.

Список литературы

1. Козин С. А., Чистякова Т. Г., Зеленцов Ю. А. Размерное травление кремния при изготовлении интегральных чувствительных элементов преобразователей механических величин // Приборы и системы управления. 1990. № 10. С. 42—43.
2. Ваганов В. И. Интегральные преобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Петерсен К. Э. Кремний как механический материал // ТИИЭР. 1982. Т. 70. № 5. С. 5—7.
4. M. Hirata, K. H. Tanigama Silicon Diaphragm Pressure Sensors fabricated by anodic oxidation etch-stop. Sensors and Actuators. 1988. V. 13. N 1. P. 63—64.
5. Михайлов П. Г., Козин С. А., Зеленцов Ю. А. Способ изготовления чувствительных элементов кремниевых тензопреобразователей. Авт. свид. 1144567 (СССР).

УДК 537.228.1 + 539.219.1

С. В. Глушанин,
В. Ю. Тополов, д-р физ.-мат. наук,
Ростовский государственный университет

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ 1—2-КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СЕНЕТОПЬЕЗОКЕРАМИКИ

Предложен алгоритм определения эффективных упругих, пьезо- и диэлектрических констант в рамках новой модели 1—2-композиата "сенетопьезокерамика—полимер". Проанализировано влияние зигзагообразных сенетопьезокерамических включений на немонокотное и знакопеременное поведение различных типов эффективных пьезокоэффициентов, не имеющее аналогов среди известных двухкомпонентных композиатов.

Пьезоэлектрические керамики и композиты на их основе составляют важнейшую группу современных функциональных материалов [1—3], применяемых в пьезоэлектрических преобразователях, ультразвуковых, сейсмологических, гидроакустических, медицинских приборах и устройствах. Большой практический и академический интерес к пьезоактивным композитам (ПК) связан с разнообразием их физических свойств, а в ряде случаев и с сильной зависимостью физических свойств от объемных концентраций компонентов и микроstructures ПК [4—8]. Одной из главных характеристик микроstructures является *связность* [7, 8]. Для двухкомпонентных ПК она записывается в виде

$\alpha-\beta$, где целые $\alpha, \beta = 0...3$ определяют число осей прямоугольной системы координат $X_1X_2X_3$, вдоль которых непрерывно распределяются первый (как правило, пьезоактивный) и второй компоненты соответственно.

Несмотря на широкое распространение ПК на основе сегнетопьезокерамики (СПК) лишь примерно для половины связностей $\alpha-\beta$ исследовалась связь микроstructure—свойства ПК. В частности, связность 1—2 и конкретная схема усреднения физических свойств рассматривались в единственной работе [7]. Ранее анализировались структуры различных 1— β - и 2—2-ПК с плоскими границами раздела, ориентированными параллельно [5, 7, 9, 10] или перпендикулярно [6, 7, 10] вектору напряженности поляризующего поля E . И только в недавних работах [11, 12] исследовались электромеханические свойства 1—3-ПК с наклонными СПК стержнями. В настоящей статье мы рассматриваем модель 1—2-ПК "СПК—полимер", содержащую систему зигзагообразных включений, и проводим анализ влияния последних на эффективные электромеханические свойства данного ПК.

В представленной на рис. 1 модели 1—2-ПК СПК пластины, пронизывающие полимерную матрицу вдоль оси OX_3 , повернуты на угол φ по или против часовой стрелки вокруг этой оси, образуя системы зигзагов. СПК пластины являются поляризованными вдоль оси OX_3 , а их объемная концентрация $t = |OA|/|OB| = |LR|/|LP|$ изменяется так, что справедливо неравенство $|KM| < |KN|$. Вследствие последнего неравенства полимерный компонент в интервале MN является непрерывным вдоль осей

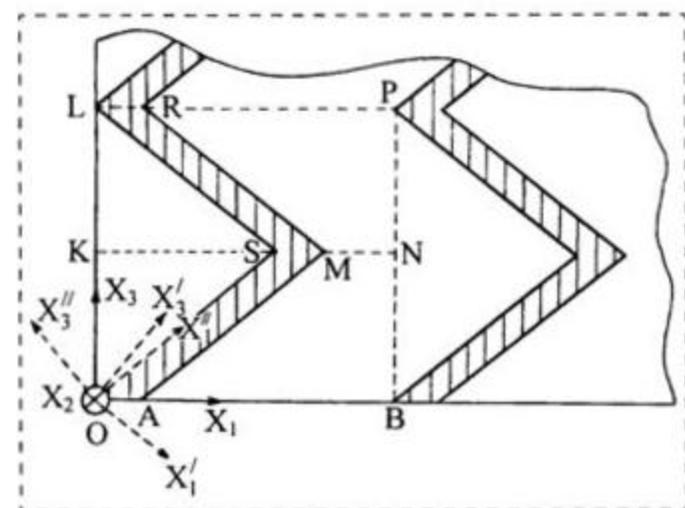


Рис. 1. Сечение 1–2-композиата "сегнетопьезокерамика–полимер" плоскостью $(X_1 O X_3)$. Штриховкой выделены сегнетопьезокерамические пластины, $\angle KSL = \angle KSO = \varphi$ – угол их поворота

$O X_2$ и $O X_3$ (двухсвязным), а СПК компонент в интервале KM – непрерывным вдоль оси $O X_2$ (односвязным). Односвязность СПК компонента выражается и в том, что прямая AR проходит через оба компонента (т. е. прямые AR и KN пересекаются в области полимерного компонента). Это геометрическое условие реализуется, например, при выборе определенных толщин $|OK|$ и $|KL|$ горизонтальных слоев. Если $|OK| = |KL|$, то объемная концентрация СПК удовлетворяет условию

$$0 < t < 1 - 0,5 \operatorname{ctg} \varphi, \quad (1)$$

т. е. вследствие неравенства $|KM| < |KN|$ она ограничена сверху зависящим от φ значением. При этом угол поворота СПК пластин задается в интервале $\operatorname{arctg} 2 < \varphi < 90^\circ$. Нарушение неравенства (1) в области $t < 1$ приводит к связности 1–1, а нарушение вышеупомянутого геометрического условия пересечения прямых AR и KN – к связности 2–2.

Алгоритм расчета эффективных электромеханических констант 1–2-ПК условно разбивается на три этапа. Для СПК ($i = 1$) и полимера ($i = 2$) в их главных кристаллографических осях уравнения пьезоэффекта [1] записываются в матричной форме как

$$\begin{pmatrix} \|\xi^{(i)}\| \\ \mathbf{D}^{(i)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \|s^{(i), E}\| & \|d^{(i)}\|^T \\ \|d^{(i)}\| & \|\varepsilon^{(i), \sigma}\| \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \|\sigma^{(i)}\| \\ \mathbf{E}^{(i)} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $\xi^{(i)}$ – механические деформации; $\sigma^{(i)}$ – механические напряжения; $\mathbf{D}^{(i)}$ – векторы электрического смещения; $\mathbf{E}^{(i)}$ – векторы напряженности электрического поля; $s^{(i), E}$ – упругие податливо-

сти, измеренные при $\mathbf{E} = \text{const}$; $d^{(i)}$ – пьезомодули; $\varepsilon^{(i), \sigma}$ – диэлектрические проницаемости, измеренные при $\sigma = \text{const}$; верхний индекс "т" обозначает транспонирование.

На первом этапе усреднения по формулам [1] определяются упругие податливости $s^{(i), E}$, пьезомодули $d^{(i)}$ и диэлектрические проницаемости $\varepsilon^{(i), \sigma}$ компонентов ПК в системе координат $(X'_1 X'_2 X'_3)$, где $O X'_1 \parallel LS$, $O X'_2 = O X_2$ и $O X'_3 \perp LS$ (рис. 1). В результате преобразования координатных осей $(X_1 X_2 X_3) \rightarrow (X'_1 X'_2 X'_3)$ уравнения пьезоэффекта для СПК и полимера записываются в форме, аналогичной (2). Слой типа $KLPN$ представляет собой ПК со связностью 2–2, и к нему применим матричный метод [13] усреднения электромеханических констант компонентов. При усреднении по концентрации t считается, что границы раздела СПК и полимера являются достаточно протяженными и удовлетворяют уравнению $x'_3 = \text{const}$. Соответствующие граничные условия [1, 7, 9, 13] для электрических и механических полей внутри компонентов предполагают непрерывность компонент векторов \mathbf{D}'_3 , \mathbf{E}'_1 , \mathbf{E}'_2 и тензоров σ'_{13} , σ'_{23} , σ'_{33} , ξ'_{11} , ξ'_{12} и ξ'_{22} . В дальнейшем проводится обратный поворот осей координат $(X'_1 X'_2 X'_3) \rightarrow (X_1 X_2 X_3)$, и усредненные упругие податливости $\|s^{(i), E}\|$, пьезомодули $\|d^{(i)}\|$ и диэлектрические проницаемости $\|\varepsilon^{(i), \sigma}\|$ слоя типа $KLPN$ преобразуются по формулам [1]. В системе координат $(X_1 X_2 X_3)$ слои типа $KLPN$ характеризуются упругими податливостями $\|s^{(A), E}\|$, пьезомодулями $\|d^{(A)}\|$ и диэлектрическими проницаемостями $\|\varepsilon^{(A), \sigma}\|$, являющимися функциями φ и t .

На втором этапе проводится преобразование осей координат $(X_1 X_2 X_3) \rightarrow (X''_1 X''_2 X''_3)$ (см. рис. 1), и для слоев типа $OKNB$ по формулам [13] рассчитываются упругие податливости $\|s^{(B), E}\|$, пьезомодули $\|d^{(B)}\|$ и диэлектрические проницаемости $\|\varepsilon^{(B), \sigma}\|$ как функции φ и t . При обратном повороте осей $(X''_1 X''_2 X''_3) \rightarrow (X_1 X_2 X_3)$ по формулам [1] определяются матрицы электромеханических констант $\|s^{(B), E}\|$, $\|d^{(B)}\|$ и $\|\varepsilon^{(B), \sigma}\|$, аналогичные вышеупомянутым с верхним индексом (A).

На третьем этапе к 1–2-ПК, представляющему собой систему слоев типов $KLPN$ и $OKNB$, чередующихся вдоль оси $O X_3$ (см. рис. 1), вновь применяется алгоритм усреднения [13] при учете равенства толщин слоев $|OK| = |KL|$. Усреднение проводится с использованием наборов электромеханических констант $\|s^{(A), E}\|$, $\|d^{(A)}\|$, $\|\varepsilon^{(A), \sigma}\|$, $\|s^{(B), E}\|$,

наборов электромеханических констант $\|s^{(A), E}\|$, $\|d^{(A)}\|$, $\|\varepsilon^{(A), \sigma}\|$, $\|s^{(B), E}\|$,

$\|d^{(B)}\|$ и $\|e^{(B), \sigma}\|$, определенных на предыдущих этапах, а граничные условия для электрических и механических полей записываются в системе координат $(X_1 X_2 X_3)$ при $x_3 = \text{const}$. В результате этого усреднения определяются матрицы эффективных упругих податливостей $\|s^{*E(\varphi, t)}\|$, пьезомодулей $\|d^{*(\varphi, t)}\|$ и диэлектрических проницаемостей $\|e^{*\sigma(\varphi, t)}\|$ 1–2-ПК в системе координат $(X_1 X_2 X_3)$. Из расчетных ориентационно-концентрационных зависимостей эффективных электромеханических свойств следует, что рассматриваемый 1–2-ПК "СПК — полимер" описывается точечной группой симметрии $mm2$ независимо от того, является полимер пьезоактивным или пьезопассивным. Ниже мы проанализируем особенности пьезоэлектрического отклика 1–2-ПК вдоль оси поляризации OX_3 , связанные с поведением пьезокоэффициентов

$$e_{3j}^*(\varphi, t) = d_{3k}^*(\varphi, t) c_{kj}^{*E}(\varphi, t) \quad (3)$$

и

$$g_{3j}^*(\varphi, t) = d_{3j}^*(\varphi, t) / \varepsilon_{33}^{*\sigma}(\varphi, t), \quad (4)$$

где $\|c^{*E}\| = \|s^{*E}\|^{-1}$ — модули упругости ПК, $j = 1; 2; 3$.

В качестве СПК компонентов со структурой типа перовскита используются ПКР-7М (один из материалов, объединяемых аббревиатурой "пьезокерамика ростовская" и являющийся аналогом PZT-5Н) и модифицированный PbTiO_3 . Экспериментальные значения электромеханических констант данных СПК, соответствующие температуре 20 °С, приведены в работе [14]. ПКР-7М, будучи сегнетомягкой СПК, среди перовскитовых керамик характеризуется наибольшим отношением $e_{33}^{(1)} / c_{33}^{(1), E}$, обуславливающим высокую пьезочувствительность 1–3- [15] и 1–1-ПК [5, 16] на ее основе. Сегнетожесткая СПК модифицированного PbTiO_3 характеризуется [14] большой анизотропией пьезомодулей $d_{33}^{(1)} / d_{31}^{(1)} = -11,6$ и пьезокоэффициентов $e_{33}^{(1)} / e_{31}^{(1)} = 14,2$, причем в отличие от подавляющего большинства перовскитовых СПК [1, 2, 14] $\text{sgn } e_{31}^{(1)} = \text{sgn } e_{33}^{(1)} > 0$. В состав исследуемых нами 1–2-ПК входит пьезопассивный полимер аральдит. Его экспериментальные константы, относящиеся к температуре $t = 20$ °С, приведены в работе [15].

Важной особенностью различных типов пьезокоэффициентов 1–2-ПК является их знакопеременное и немонотонное поведение (рис. 2, 3).

В частности, равенства $d_{31}^*(\varphi, t_d) = 0$ (рис. 2, а) и $e_{31}^*(\varphi, t_e) = 0$ (рис. 2, з) выполняются при определенных объемных концентрациях t_d или t_e пластин из СПК ПКР-7М. Несмотря на ограниченную область допустимых значений t_e (см. неравенство (1)) и малую анизотропию пьезомодулей $d_{33}^{(1)} / d_{31}^{(1)} = -2,17$ [14, 15] ПКР-7М в 1–2-ПК на ее основе удается варьировать анизотропию $d_{33}^* / d_{3j}^* = g_{33}^* / g_{3j}^*$ и e_{33}^* / e_{3j}^* ($j = 1; 2$) в достаточно широких интервалах. Различия между конфигурациями кривых $d_{31}^*(\varphi, t)$ и $e_{31}^*(\varphi, t)$ при $\varphi = \text{const}$ (ср. рис. 2, а и рис. 2, з) наиболее существенны, когда угол поворота

$$\text{arcctg } 2 < \varphi \leq 45^\circ, \quad (5)$$

а удовлетворяющие условию (1) объемные концентрации СПК $0 < t \leq 0,5$. Эти различия в значительной мере связаны с наличием протяженных областей полимера, распределяющегося вдоль оси OX_1 (см. отрезки KS и MN на сечении ПК, см. рис. 1). Упругие свойства полимера влияют на модули упругости ПК $c_{1k}^{*E}(\varphi, t)$, а благодаря электромеханической связи (3) — и на различия между t_d и t_e при $\varphi = \text{const}$.

Вместе с тем $d_{32}^*(\varphi, t) < 0$ во всей области допустимых значений (рис. 2, б), а $e_{32}^*(\varphi, t)$ изменяет знак (рис. 2, д) при углах φ из (5) и концентрациях $t \ll 1$. Непрерывность СПК включений вдоль оси OX_2 (см. рис. 1) неоднозначно влияет на пьезокоэффициенты d_{32}^* и e_{32}^* 1–2-ПК. Одной из причин неравенства $\text{sgn } d_{32}^* \neq \text{sgn } e_{32}^*$ в соответствии с формулой (3) является анизотропия упругих свойств 1–2-ПК, проявляющаяся в различиях между его модулями упругости c_{12}^{*E} , c_{22}^{*E} и c_{23}^{*E} в области $t \ll 1$. Эти различия непосредственно связаны с дискретным характером распределения СПК компонента вдоль осей OX_1 и OX_2 . Отметим также, что при $\varphi \geq 58^\circ \text{sgn } d_{31}^*(\varphi, t) = \text{sgn } d_{31}^{(1)} < 0$ (рис. 2, а) и $\text{sgn } g_{33}^*(\varphi, t) - \text{sgn } g_{33}^{(1)} > 0$ (рис. 2, ж) независимо от t , что в некоторой степени сближает рассматриваемый 1–2-ПК с исследованными в работе [14] 2–2-ПК на основе СПК типа $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$.

В отличие от ранее рассмотренных примеров между зависимостями $d_{33}^*(\varphi, t)$ и $e_{33}^*(\varphi, t)$ прослеживается определенная корреляция: в широких

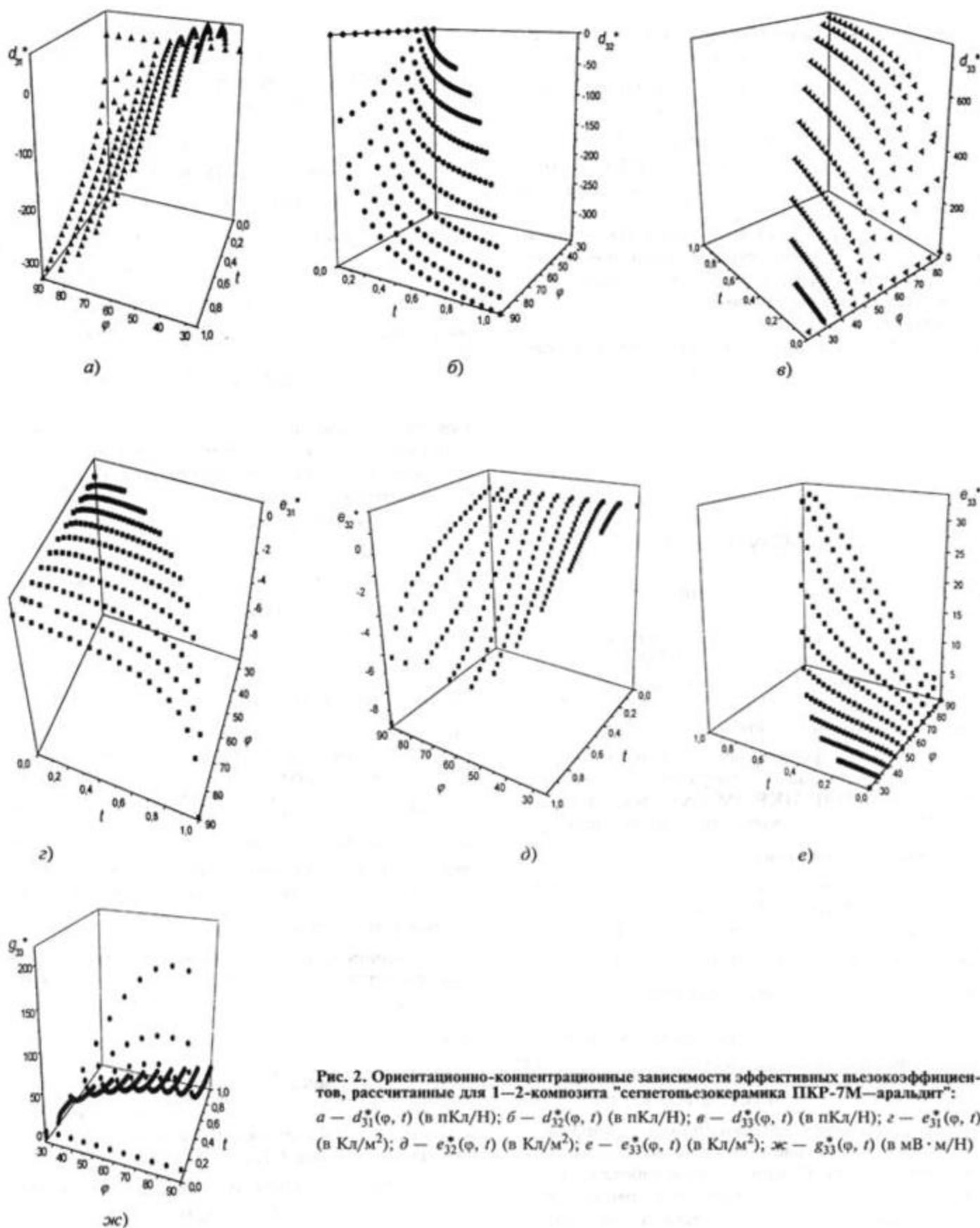


Рис. 2. Ориентационно-концентрационные зависимости эффективных пьезокоэффициентов, рассчитанные для 1–2-композиата "сегнетопьезокерамика ПКР-7М—аральдиг":

а — $d_{31}^*(\varphi, t)$ (в пКл/В); б — $d_{32}^*(\varphi, t)$ (в пКл/В); в — $d_{33}^*(\varphi, t)$ (в пКл/В); г — $e_{31}^*(\varphi, t)$ (в Кл/м²); д — $e_{32}^*(\varphi, t)$ (в Кл/м²); е — $e_{33}^*(\varphi, t)$ (в Кл/м²); ж — $g_{33}^*(\varphi, t)$ (в мВ·м/В)

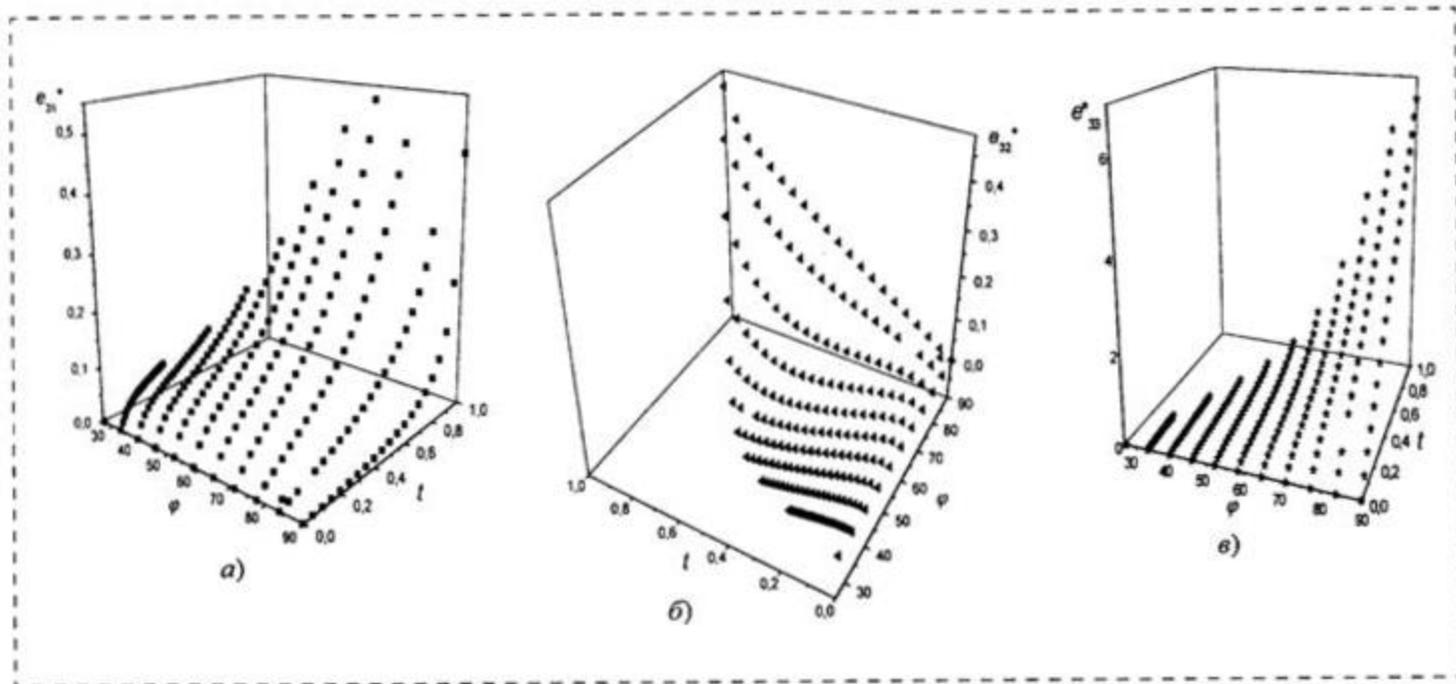


Рис. 3. Ориентационно-концентрационные зависимости эффективных пьезокоэффициентов, рассчитанные для 1–2-композиата "сегнетопьезокерамика модифицированного PbTiO_3 —аральдит":

а — $e_{31}^*(\varphi, t)$ (в Кл/м²); б — $e_{32}^*(\varphi, t)$ (в Кл/м²); в — $e_{33}^*(\varphi, t)$ (в Кл/м²)

интервалах параметров (φ, t) данные пьезокоэффициенты изменяются монотонно, а их поверхности на графиках имеют аналогичную форму (ср. рис. 2, в и рис. 2, е). Такая корреляция, как следует из соотношения (3), объясняется существенным вкладом слагаемого $d_{33}^*(\varphi, t) c_{33}^{*E}(\varphi, t)$ в пьезокоэффициент $e_{33}^*(\varphi, t)$ и монотонным изменением модуля упругости $c_{33}^{*E}(\varphi, t)$. И только при $\varphi \rightarrow 90^\circ$ и $t > 0,9$ удается достичь слабый $\text{max } e_{33}^*(\varphi, t)$, свойственный различным 1- β -ПК на основе ПКР-7М (причины существования подобных максимумов обсуждались в работе [7]).

Пьезокоэффициенты $g_{3j}^*(\varphi, t)$ в значительной мере зависят от ориентации СПК пластин. С возрастанием угла φ заметно изменяются значения локальных $\text{max } g_{33}^*(\varphi, t)$ в области $0 < t < 0,1$ (рис. 2, ж). Согласно нашим расчетам, при различных $\varphi = \text{const}$ и $t \ll 1$ диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{33}^{*\sigma}(\varphi, t)$ изменяется достаточно медленно и остается на 1–3 порядка меньше, чем $\epsilon_{33}^{(1),\sigma}$ СПК, а пьезомодуль $d_{33}^*(\varphi, t)$ быстро возрастает с увеличением t . В соответствии с формулой (4) такое изменение $e_{33}^{*\sigma}(\varphi, t)$

и $d_{33}^*(\varphi, t)$ благоприятствует появлению $\text{max } g_{33}^*(\varphi, t)$, причем в интервале $60^\circ \leq \varphi < 90^\circ$ расчетные значения локальных $\text{max } g_{33}^*(\varphi, t)$ превышают экспериментальное значение пьезокоэффициента СПК ПКР-7М $g_{33}^{(1)} = 17,2 \text{ мВ} \cdot \text{м/Н}$ более чем в 10 раз.

В отличие от 1–2-ПК на основе ПКР-7М в 1–2-ПК "СПК модифицированного PbTiO_3 — аральдит" $e_{31}^*(\varphi, t) > 0$ во всей области допустимых значений (φ, t) (рис. 3, а), а $e_{33}^*(\varphi, t)$ не имеет локальных максимумов при $\varphi \rightarrow 90^\circ$ и $t \rightarrow 1$ (рис. 3, в). Кроме того, пьезокоэффициент $e_{32}^*(\varphi, t)$ демонстрирует оригинальное немонотонное и знакопеременное поведение (рис. 3, б), не отмечавшееся ранее [6, 16] в работах по родственным α – β -ПК на основе СПК модифицированного PbTiO_3 . Столь четкое разделение зависимостей $e_{3j}^*(\varphi, t)$, по нашему мнению, связано с большой анизотропией пьезокоэффициентов этой СПК ($d_{33}^{(1)}/d_{31}^{(1)} = -11,6$, $e_{33}^{(1)}/e_{31}^{(1)} = 14,2$) и со значительной анизотропией ее модулей упругости (согласно данным [14], $c_{11}^{(1),E}/c_{12}^{(1),E} = 4,45$, $c_{11}^{(1),E}/c_{13}^{(1),E} = 5,94$ и

$c_{33}^{(1),E}/c_{13}^{(1),E} = 5,64$). В пользу данного предположения свидетельствует тот факт, что пьезомодуль $e_{32}^*(\varphi, t) < 0$ во всей области допустимых значений (φ, t) и монотонно убывает при $\varphi = \text{const}$. Поэтому, согласно формуле (3), $\text{sgn } e_{32}^*(\varphi, t)$ существенно зависит от конкуренции вкладов $d_{31}^*(\varphi, t) c_{12}^{*E}(\varphi, t)$ и $d_{33}^*(\varphi, t) c_{23}^{*E}(\varphi, t)$, а последние заметно изменяются с возрастанием как угла φ (усиление пьезоэлектрического отклика ПК вдоль оси OX_3), так и концентрации t (увеличение жесткости ПК вдоль оси OX_2).

Заключение

Подводя итоги исследования новых 1–2-ПК "СПК–полимер", отметим следующее. Несмотря на сравнительно сложную микрогеометрию рассматриваемых ПК их удается описать на основе модели, содержащей систему наклонных плоских границ между компонентами. При этом прогнозирование эффективных электромеханических свойств осуществляется в рамках матричного подхода [5–7, 10, 13, 16], который впервые распространяется на систему односвязных зигзагообразных СПК включений (наклонных СПК пластин). Наличие таких включений обуславливает не только симметрию mm_2 , но и нетривиальное поведение различных типов эффективных пьезокоэффициентов ПК. В частности, расчетные данные по 1–2-ПК на основе СПК ПКР-7М свидетельствуют о достижении в определенных интервалах (φ, t) как высокой пьезочувствительности, так и варьируемой в широких пределах пьезоэлектрической анизотропии. 1–2-ПК на основе СПК модифицированного PbTiO_3 интересен с точки зрения высокой анизотропии двух типов пьезокоэффициентов — $d_{3j}^*(\varphi, t)$ и $e_{3j}^*(\varphi, t)$. В отличие от известных родственных 1– β -ПК [7] в данном 1–2-ПК имеет место своеобразный пьезоэлектрический отклик вдоль осей OX_2 и OX_3 . Вследствие большой анизотропии пьезоэлектрических и упругих свойств внутренние электрические и механические поля перераспределяются таким образом, что $e_{32}^*(\varphi, t) \rightarrow 0$ в широких интервалах φ и t , причем последнее условие выполняется несмотря на непрерывное распределение СПК включений вдоль оси OX_2 . Эти и другие расчетные характеристики новых 1–2-ПК "СПК–полимер" указывают на перспективность исследований фи-

зических свойств и применений подобных ПК в пьезоэлектрической, микросистемной, медицинской технике, акустике и т. д.

Авторы выражают благодарность д-ру техн. наук А. Е. Паничу и д-ру физ.-мат. наук, проф. А. В. Турику (РГУ, Ростов-на-Дону) за постоянный интерес к тематике исследований. Работа выполнена при частичной поддержке по теме 11.01.02д НИР РГУ.

Список литературы

1. Горш А. В., Дудкевич В. П., Куприянов М. Ф. и др. Пьезоэлектрическое приборостроение / Под ред. А. В. Горша. Т. I. Физика сегнетоэлектрической керамики. М.: ИПРЖР, 199. 368 с.
2. Uchino K. Piezoelectric actuators and ultrasonic motors. Boston etc., Kluwer Acad. Publ. 1997. 349 p.
3. Safari A. Novel piezoelectric ceramics and composites for sensor and actuator applications // Mater. Res. Innovat. 1999. V. 2. N 5. P. 263–269.
4. Dias C. J., Das-Gupta D. K. Piezo- and pyroelectricity in ferroelectric ceramic-polymer composites // Key Eng. Mater. 1994. V. 92–93. P. 217–248.
5. Глушанин С. В., Тополов В. Ю. Анизотропия электромеханических свойств и высокая пьезочувствительность композитов типа 1–1 // Письма ЖТФ. 2001. Т. 27 № 15. С. 15–21.
6. Тополов В. Ю., Глушанин С. В. Новые 1–3-композиаты и особенности их пьезоэлектрических свойств // Микросистемная техника. 2002. № 6. С. 12–16.
7. Topolov V. Yu., Glushanin S. V. Evolution of connectivity patterns and links between interfaces and piezoelectric properties of two-component composites // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V. 35. N 16. P. 2008–2014.
8. Newnham R. E. Molecular mechanisms in smart materials // MRS Bull. 1997. V. 22. N 5. P. 20–34.
9. Grekov A. A., Kramarov S. O., Kuprienko A. A. Anomalous behavior of the two-phase lamellar piezoelectric texture // Ferroelectrics. 1987. V. 76. N 1–4. P. 43–48.
10. Levassort F., Topolov V. Yu., Lethiecq M. A comparative study of different methods of evaluating effective electromechanical properties of 0–3 and 1–3 ceramic / polymer composites // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. N 16. P. 2064–2068.
11. Nan C. W., Liu L., Guo D., Li L. Calculations of the effective properties of 1–3 type piezoelectric composites with various rod / fibre orientations // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. N 22. P. 2977–2984.
12. Nan C. W., Weng G. J. Influence of polarization orientation on the effective properties of piezoelectric composites // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. N. 1. P. 416–423.
13. Akcakaaya E., Farnell G. W. Effective elastic and piezoelectric constants of superlattices // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 9. P. 4469–4473.
14. Topolov V. Yu., Turik A. V. Non-monotonic concentration dependence of electromechanical properties of piezoelectric 2–2 composites // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. N 6. P. 725–737.
15. Тополов В. Ю., Турик А. В. Пористые пьезокомпозиты с экстремально высокими параметрами приема // ЖТФ. 2001. Т. 71. № 9. С. 26–32.
16. Glushanin S. V., Topolov V. Yu. Features of electromechanical properties of piezoelectric composites with elements of connectivity 1–1 // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. N 16. P. 2518–2529.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 621.371:551.46 + 551.521 + 615.47

К. П. Гайкович, д-р физ.-мат. наук,
В. Ф. Дряхлушин, канд. физ.-мат. наук,
А. В. Жилин,
Институт физики микроструктур РАН
(Нижний Новгород)

УЛУЧШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СБОМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ УЧЕТА ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ЗОНДА¹

Достигнуто существенное увеличение разрешения в сканирующей ближнеполюсной оптической микроскопии (СБОМ) путем деконволюции измеряемого двумерного распределения на основе метода Тихонова с учетом формы передаточной функции зонда, которая определялась по наименьшим деталям обрабатываемого изображения.

Введение

Для восстановления СБОМ-изображений, искаженных влиянием передаточной функции зонда, разработан метод деконволюции, основанный на теории некорректных задач Тихонова. Задача учета влияния аппаратной функции на измеряемые двумерные изображения актуальна во многих областях физики (в радиоастрономии, в пассивном и активном СВЧ зондировании, в различных видах микроскопии). Это влияние приводит к сглаживанию истинного распределения и даже его искажению в случаях, когда передаточная функция имеет сложную структуру. Если передаточная функция известна (даже приближенно), можно рассмотреть обратную задачу восстановления изображения. Эта задача обычно заключается в решении интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода типа двумерной свертки, которое представляет собой хорошо известную некорректную задачу. В данной работе для ее решения используется ме-

тод обобщенной невязки Тихонова [1]. Аналогичный метод был с успехом использован нами в задаче восстановления двумерного распределения токов на сверхпроводящей пленке по измерениям магнитного поля над ее поверхностью [2] и при обработке данных СВЧ зондирования [3].

Восстановление изображения

Если измеряется двумерное распределение некоторой величины, которое формирует измеренное изображение, то в большинстве случаев связь этого измеренного изображения с истинным может быть представлена (по крайней мере, приблизительно) уравнением двумерной свертки:

$$z_m(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(x-s, y-t) \times z(s, t) ds dt, \quad (1)$$

где ядро $K(w, W)$ — передаточная функция; $z_m(x, y)$ — измеренный сигнал; $z(s, t)$ — искомое истинное изображение. Приближенное решение (1) относительно $z(s, t)$ позволяет восстановить изображение с лучшей разрешающей способностью. Известно, что точ-

ность восстановления для некорректных задач может быть оценена только на основе результатов численного моделирования, которое для использованного в данной работе метода представлено в [3].

В данной работе этот метод был использован для восстановления изображений в СБОМ. Ключевым элементом в СБОМ является зонд [4], показанный на рис. 1. Именно размер апертуры зонда определяет разрешение микроскопа и мощность его оптического излучения; при этом оказывается, что данный размер (и, следовательно, разрешающая способность) составляет 50–100 нм, т. е. много меньше длины волны света. Размер апертуры определяет и эффективную полуширину передаточной функции (ядра K) в (1), которую нам необходимо знать, чтобы решить уравнение. В данной работе предлагается метод определения передаточной функции зонда, который реализуем в случаях, когда в пространственном спектре неоднородностей исследуемой поверхности (или соответствующей тестовой структуры) имеются неоднородности, много меньшие, чем размер апертуры. Такие неоднородности могут рассматриваться как δ -функции, т. е. $z(x, y) = \delta(x, y)$, и из (1) мы имеем:

$$z_m(x, y) = K(x, y).$$



Рис. 1. Зонд для системы СБОМ

¹Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 03-02-17321.

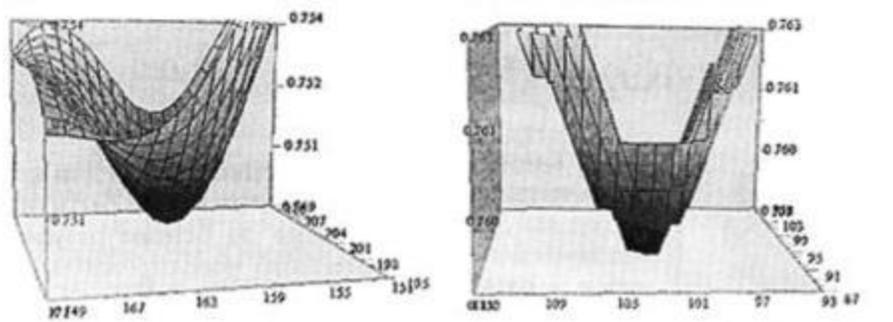


Рис. 2. Два примера наименьших деталей СБОМ-изображения (в мВ), форма которых определяет передаточную функцию $K(x, y)$. Линейный размер пикселя 3,3 нм

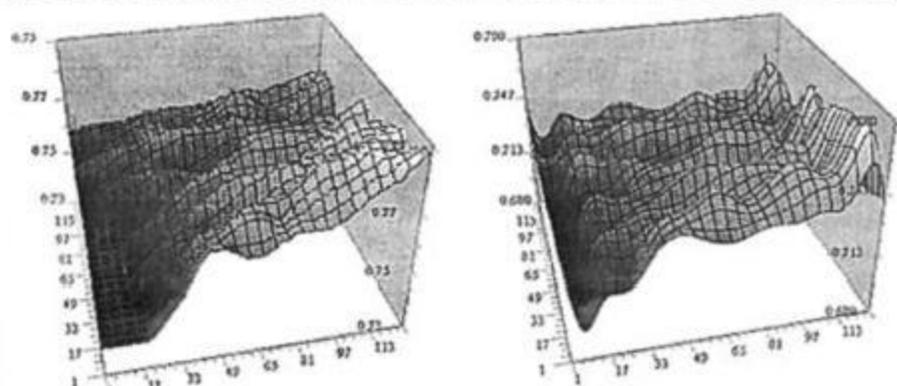


Рис. 4. Исходное (слева) и восстановленное (справа) СБОМ-изображения (в мВ). Линейный размер пикселя 3,3 нм

Критерий наличия таких маленьких структур на исследуемой поверхности весьма прост: все наименьшие детали изображения должны быть одинаковыми и повторять форму передаточной функции зонда $K(x, y)$. На рис. 2 показаны два примера таких наименьших деталей в СБОМ-изображении, представленного полностью на рис. 3 (слева), которое анализируется в данной работе. Анализ показал, что соответствующая передаточная функция хорошо аппроксимируется двумерным гауссовым распределением

$$K(x, y) = \frac{4}{\pi\sigma_x\sigma_y} \times \exp\left[-4\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \quad (2)$$

с параметрами $\sigma_x = \sigma_y = \sigma \approx 20$ пикселей = 66 нм. Это значение σ можно рассматривать как разрешающую способность, реализо-

ванную в исходном СБОМ-изображении и, кроме того, как оценку (сверху) размера апертуры зонда $D < 66$ нм, что выглядит как весьма разумное значение.

Результаты восстановления СБОМ-изображения

На рис. 3 представлены результаты восстановления СБОМ-

изображения. Очевидно, что восстановленное изображение оказывается существенно более качественным и резким — край образца (слева внизу) виден гораздо более отчетливо. В качестве тестовой структуры использовалась ванадиевая пленка на кварцевой подложке, протравленная таким образом, что ее толщина варьировала в пределах от 0 до 10 нм. Исходное изображение было получено с помощью сканирующего ближнепольного микроскопа "Аврора" фирмы "Торометрикс", функционирующего на рабочей длине волны оптического излучения 488 нм; коэффициент пропускания зонда составлял $4 \cdot 10^{-3}$. Уровень шума, определяющий меру погрешности (единственный параметр метода Тихонова, с которым связан параметр регуляризации), составлял 0,03 мВ.

При данном уровне точности измерений разрешение, достигнутое на восстановленном изображении, увеличилось, по крайней мере, в 3 раза по сравнению с разрешением на исходном изображении. Достигнутая разрешающая способность σ_r оценивалась по наименьшим деталям восстановленного изображения точно так же, как и разрешающая способность исходного изображения σ , из аппроксимации наименьших деталей формулой (2). Таким образом, мы получили оценку $\sigma_r \approx 22$ нм, что составляет около 0,045 рабочей длины волны системы СБОМ. На рис. 4 исходное и восстановленное изо-

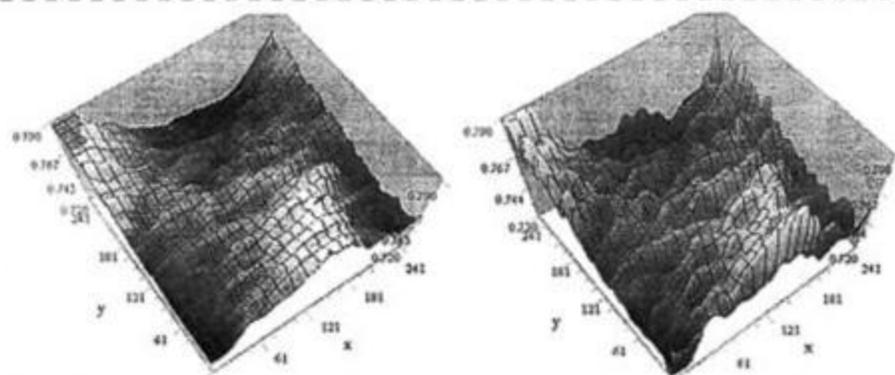


Рис. 4. Исходное (слева) и восстановленное (справа) СБОМ-изображения (в мВ). Линейный размер пикселя 3,3 нм

бражения показаны для большего участка поверхности пленки.

Заключение

Представленные результаты показывают, что развитый в работе метод численной обработки СБОМ-изображений, включающий способ определения передаточной функции зонда по наименьшим деталям анализируемого изображения, позволяет суще-

ственно улучшить их резкость, т. е. разрешение структуры неоднородностей анализируемой поверхности. Аналогичный подход может успешно применяться и в других видах сканирующей микроскопии.

Список литературы

1. Tikhonov A. N. Solution of ill-posed problems. New York, Winston, 1977.

2. Gaikovich K. P., Nozdrin Yu. N., Reznik A. N., and Zhilin A. V. XII German-Russian-Ukrainian Seminar on High Temperature Superconductivity (25–29 October, 1999, Kiev, Ukraine). Kiev: V. N. Bakul Institut for Superhard Materials of National Academy of the Ukraine. 1999. 86 p.

3. Gaikovich K. P. and Zhilin A. V. // Radiophysics and Quantum Electronics. 1999. 42. P. 825.

4. Dryakhlushin V. F., Klimov A. Yu., Rogov V. V., and Gusev S. A. // Instruments and experimental techniques. 1998. 41. P. 139.

УДК 004.7:004.896

И. А. Каляев, д-р техн. наук, проф.,
НИИ МВС ТРТУ

АЛГОРИТМ ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В "ТУЧЕ" МИКРОРОБОТОВ

Рассматривается проблема разбиения "тучи" микророботов на группы (кластеры), предназначенные для решения множества целевых задач, поставленных перед "тучей". Предлагается алгоритм кластеризации "тучи", основанный на стратегии коллективного принятия решений и отличающийся простой технической реализацией. Приводятся результаты экспериментальных исследований разработанного алгоритма на программной модели.

Введение

Проблеме создания отдельного микроробота посвящено достаточно большое число исследований [1, 2]. В то же время отдельный микроробот обладает, как правило, крайне ограниченными возможностями. Поэтому эффективное функционирование микророботов возможно только при их массовом применении. Примером такого массового применения может служить так называемая "умная пыль", когда "туча" простейших микророботов используется для решения некоторого множества целевых задач. При этом, если для решения каждой целевой задачи необходимо свое количество микророботов из "тучи", то возникает проблема разбиения (кластеризации) "тучи" на такие группы (кластеры), которые способны решить те или иные задачи, поставленные перед "тучей".

Ряд подходов к проблеме кластеризации массово-применяемых микророботов предложен в работе [3]. Эти подходы основаны на использовании

принципов коллективного принятия решений, когда каждый микроробот группы самостоятельно осуществляет выбор своей цели с учетом текущего выбора других микророботов группы, пытаясь при этом внести максимально возможный вклад в решение общей (групповой) задачи. Использование данных принципов позволяет достичь ряда преимуществ. Во-первых, каждый микроробот группы решает относительно несложную задачу оптимизации своих действий (выбора своей цели) в текущей ситуации. Во-вторых, распределенная организация системы группового управления, где каждый микроробот имеет свой узел принятия решения, обеспечивает высокую живучесть системы в целом. Однако предложенные в [3] алгоритмы довольно трудоемки с вычислительной точки зрения, что может затруднить их реализацию с помощью бортовых вычислителей простейших микророботов. Поэтому в настоящей работе предлагается простой алгоритм целераспределения (кластеризации) в "туче" микророботов, основанный на принципах коллективного принятия решений.

1. Формализация проблемы

Формально проблему можно сформулировать следующим образом. Пусть существует "туча", содержащая N простейших микророботов R_j ($j = 1, N$). При этом будем полагать, что каждый микроробот R_j "тучи" имеет возможность:

- определять координаты x_j^T, y_j^T, z_j^T своего текущего положения в среде;
- управлять своим движением в точку с заданными координатами;
- осуществлять прием и передачу информации со всеми остальными микророботами "тучи".

Положим, что "туче" микророботов задано для выполнения M целей из множества $P = \{p_i, i = 1, M\}$,

бражения показаны для большего участка поверхности пленки.

Заключение

Представленные результаты показывают, что развитый в работе метод численной обработки СБОМ-изображений, включающий способ определения передаточной функции зонда по наименьшим деталям анализируемого изображения, позволяет суще-

ственно улучшить их резкость, т. е. разрешение структуры неоднородностей анализируемой поверхности. Аналогичный подход может успешно применяться и в других видах сканирующей микроскопии.

Список литературы

1. Tikhonov A. N. Solution of ill-posed problems. New York, Winston, 1977.

2. Gaikovich K. P., Nozdrin Yu. N., Reznik A. N., and Zhilin A. V. XII German-Russian-Ukrainian Seminar on High Temperature Superconductivity (25–29 October, 1999, Kiev, Ukraine). Kiev: V. N. Bakul Institut for Superhard Materials of National Academy of the Ukraine. 1999. 86 p.

3. Gaikovich K. P. and Zhilin A. V. // Radiophysics and Quantum Electronics. 1999. 42. P. 825.

4. Dryakhlushin V. F., Klimov A. Yu., Rogov V. V., and Gusev S. A. // Instruments and experimental techniques. 1998. 41. P. 139.

УДК 004.7:004.896

И. А. Каляев, д-р техн. наук, проф.,
НИИ МВС ТРТУ

АЛГОРИТМ ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В "ТУЧЕ" МИКРОРОБОТОВ

Рассматривается проблема разбиения "тучи" микророботов на группы (кластеры), предназначенные для решения множества целевых задач, поставленных перед "тучей". Предлагается алгоритм кластеризации "тучи", основанный на стратегии коллективного принятия решений и отличающийся простой технической реализацией. Приводятся результаты экспериментальных исследований разработанного алгоритма на программной модели.

Введение

Проблеме создания отдельного микроробота посвящено достаточно большое число исследований [1, 2]. В то же время отдельный микроробот обладает, как правило, крайне ограниченными возможностями. Поэтому эффективное функционирование микророботов возможно только при их массовом применении. Примером такого массового применения может служить так называемая "умная пыль", когда "туча" простейших микророботов используется для решения некоторого множества целевых задач. При этом, если для решения каждой целевой задачи необходимо свое количество микророботов из "тучи", то возникает проблема разбиения (кластеризации) "тучи" на такие группы (кластеры), которые способны решить те или иные задачи, поставленные перед "тучей".

Ряд подходов к проблеме кластеризации массово-применяемых микророботов предложен в работе [3]. Эти подходы основаны на использовании

принципов коллективного принятия решений, когда каждый микроробот группы самостоятельно осуществляет выбор своей цели с учетом текущего выбора других микророботов группы, пытаясь при этом внести максимально возможный вклад в решение общей (групповой) задачи. Использование данных принципов позволяет достичь ряда преимуществ. Во-первых, каждый микроробот группы решает относительно несложную задачу оптимизации своих действий (выбора своей цели) в текущей ситуации. Во-вторых, распределенная организация системы группового управления, где каждый микроробот имеет свой узел принятия решения, обеспечивает высокую живучесть системы в целом. Однако предложенные в [3] алгоритмы довольно трудоемки с вычислительной точки зрения, что может затруднить их реализацию с помощью бортовых вычислителей простейших микророботов. Поэтому в настоящей работе предлагается простой алгоритм целераспределения (кластеризации) в "туче" микророботов, основанный на принципах коллективного принятия решений.

1. Формализация проблемы

Формально проблему можно сформулировать следующим образом. Пусть существует "туча", содержащая N простейших микророботов R_j ($j = 1, N$). При этом будем полагать, что каждый микроробот R_j "тучи" имеет возможность:

- определять координаты x_j^T, y_j^T, z_j^T своего текущего положения в среде;
- управлять своим движением в точку с заданными координатами;
- осуществлять прием и передачу информации со всеми остальными микророботами "тучи".

Положим, что "туче" микророботов задано для выполнения M целей из множества $P = \{p_i, i = 1, M\}$,

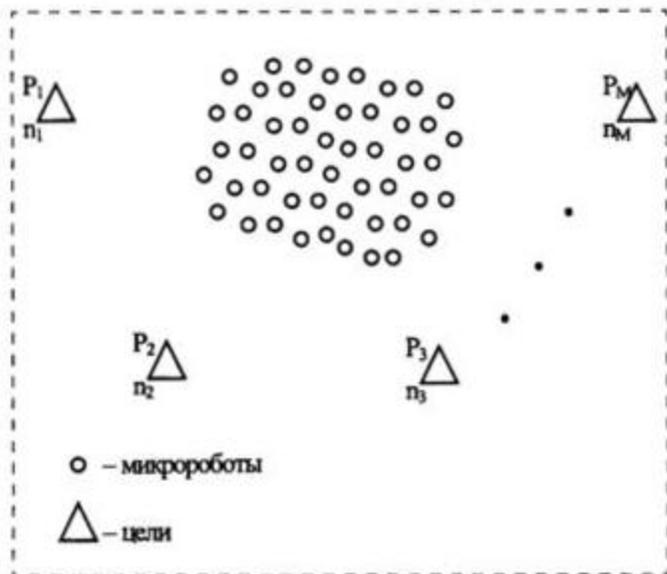


Рис. 1

причем цель p_i определяется координатами x_i^p, y_i^p, z_i^p ее положения в среде. Цель p_i ($i = 1, M$) может быть решена (обеспечена), если ее достигнет группа не менее чем из $n_i < N$ микро-роботов. При этом будем считать, что каждому микро-роботу R_j ($j = 1, N$) изначально доступна информация о координатах x_i^p, y_i^p, z_i^p ($i = 1, M$) всех целей из множества P , а также о количестве n_i микро-роботов, необходимых для их обеспечения (рис. 1).

2. Алгоритм кластеризации

Можно предложить следующий алгоритм кластеризации "тучи" микро-роботов на группы, каждая из которых будет обеспечивать ту или иную цель из множества P . Для этого в памяти каждого микро-робота необходимо сформировать два одномерных массива C_1 и C_2 , число элементов в которых равно $M + 1$, где M — число целей, стоящих перед "тучей". Каждый элемент $c_i^1 \in C_1$ ($i = 1, M$) хранит информацию о числе n_i микро-роботов, необходимых для обеспечения i -й цели $p_i \in P$, а элемент c_{M+1}^1 равен числу N микро-роботов в "туче".

Вместе с тем, элемент c_i^2 ($i = 1, M$) массива C_2 хранит информацию о числе микро-роботов "тучи", выбравших цель p_i к текущему моменту времени, а элемент c_{M+1}^2 определяет число "резервных" микро-

роботов, не выбравших никакую цель из множества P .

Основная идея предлагаемого алгоритма заключается в организации последовательной процедуры принятия решения (целераспределения) среди микро-роботов "тучи". Перед началом этой процедуры все элементы массива C_2 у всех микро-роботов R_j ($j = 1, N$) должны быть обнулены. Первым решение принимает робот R_j с минимальным номером (все микро-роботы "тучи" должны быть предварительно пронумерованы исходя, например, из их приоритетов). В качестве цели он выбирает ту цель $p_i \in P$, расстояние до которой минимально, т. е. минимальное значение

$$L = \sqrt{(x_i^p - x_j^T)^2 + (y_i^p - y_j^T)^2 + (z_i^p - z_j^T)^2}, \quad (1)$$

где x_i^p, y_i^p, z_i^p — координаты цели; x_j^T, y_j^T, z_j^T — текущие координаты робота (для первого робота $j = 1$).

Далее, микро-робот R_j осуществляет проверку — сколько роботов уже выбрали данную цель к текущему моменту времени. Для этого он считывает из своей памяти i -й элемент c_i^2 массива C_2 и сравнивает его с i -м элементом c_i^1 массива C_1 . Если

$$c_i^2 < c_i^1, \quad (2)$$

то это означает, что число микро-роботов, выбравших i -ю цель, не достаточно для ее обеспечения. В этом случае микро-робот R_j выбирает данную цель в качестве своей цели. Заметим, поскольку перед началом процедуры кластеризации все элементы массива C_2 обнулены, то для первого робота R_1 условие (2) будет выполняться при любом $i \in 1, M$.

Если же

$$c_i^2 > c_i^1,$$

то это означает, что i -я цель уже обеспечена. В этом случае микро-робот R_j делает попытку выбрать в качестве своей цели другую цель из множества P . Для этого среди оставшегося множества целей P/p_i он находит, согласно выражению (1), наиболее близкую к себе цель p_k ($k \in 1, M$), после чего анализирует ее обеспеченность. Если

$$c_k^2 < c_k^1,$$

то это означает, что данная цель еще не обеспечена. Поэтому микро-робот R_j выбирает ее в качестве своей цели. В противном случае он вновь пытается выбрать такую следующую цель из оставшегося

множества $P/p_i \cup p_k$, которая расположена ближе всего к нему.

Процесс продолжается до тех пор, пока робот R_j не выберет себе цель. При этом, если все цели из множества P уже обеспечены, то робот R_j будет включен в резервный $(M + 1)$ -й кластер, поскольку условие

$$c_{M+1}^2 < c_{M+1}^1 = N$$

будет выполняться всегда.

После завершения описанной выше процедуры принятия решения робот R_j передает информацию

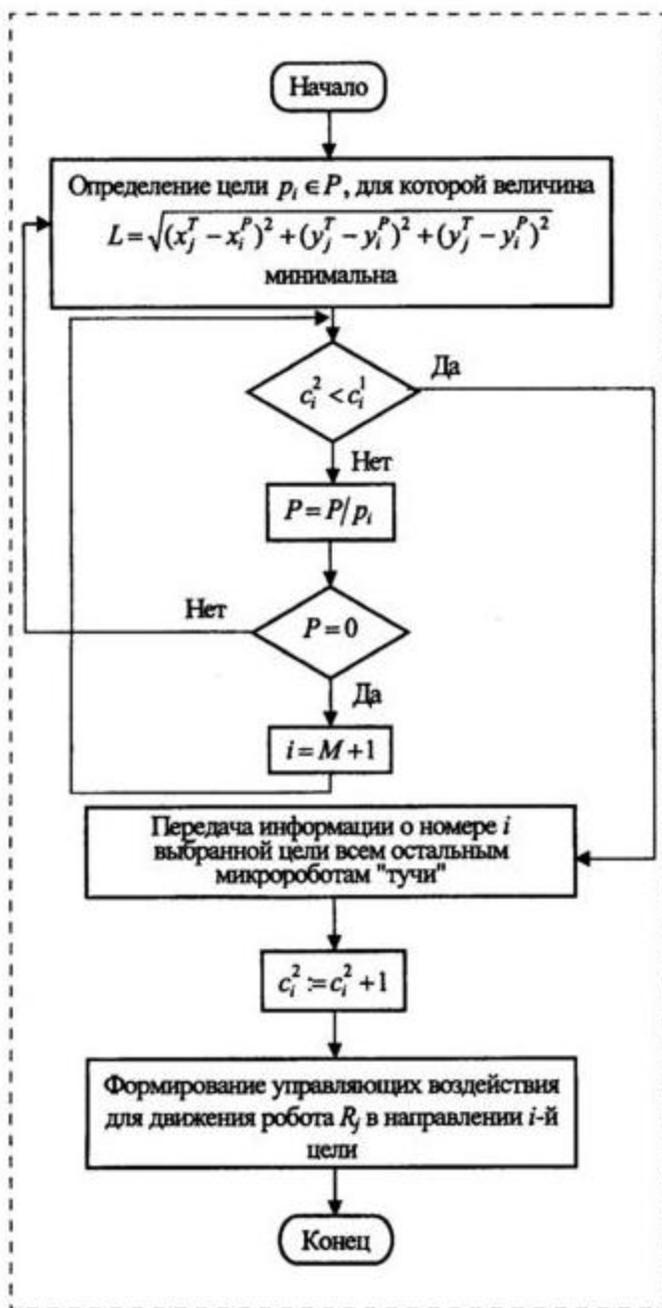


Рис. 2

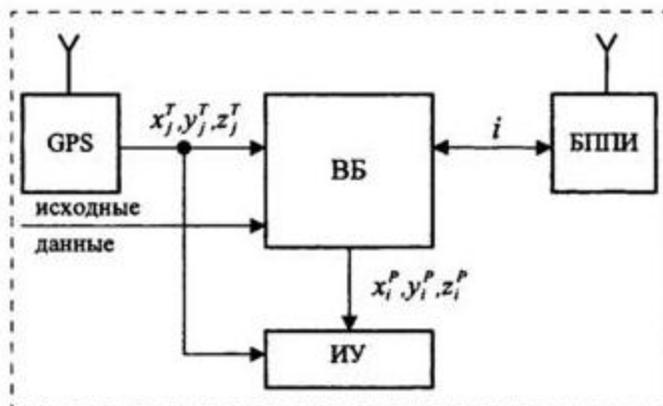


Рис. 3

о своем выборе всем остальным роботам "тучи", т. е. передает номер i выбранной им цели. На основании этой информации все роботы "тучи" наращивают значение соответствующего i -го элемента массива C_2 на единицу. Кроме того, робот R_j передает информацию о координатах выбранной им цели на свои исполнительные устройства для обработки движения в направлении точки ее положения. Следует отметить, что в качестве координат целевого положения резервного кластера можно задать координаты любой точки пространства, например, среднеудаленной от всех целей множества P .

Граф-схема предложенного выше алгоритма принятия решения j -м роботом "тучи" представлена на рис. 2, а структурная организация системы управления отдельного микробота, отвечающая данному алгоритму, — на рис. 3. Здесь ББ — вычислительный блок, реализующий алгоритм принятия решения; GPS — приемник глобальной спутниковой навигации, с помощью которого определяются координаты текущего положения робота R_j в пространстве; БПИИ — блок приема-передачи информации, с помощью которого осуществляется связь микробота R_j с остальными роботами "тучи"; ИУ — исполнительные устройства, обрабатывающие движение микробота R_j в направлении выбранной цели; "исходные данные" — исходная информация о координатах целей и числе микроботов, необходимых для их обеспечения, передаваемая с некоторого командного пункта одновременно всем микроботам "тучи".

По завершению процедуры принятия решения микроботом R_j аналогичную процедуру осуществляет микробот R_{j+1} , затем R_{j+2} и т. д. вплоть до робота R_N . В результате все микроботы "тучи" будут разбиты на $(M + 1)$ кластер, каждый из которых будет направлен на обеспечение соответствующей цели из множества P (рис. 4). При этом, если

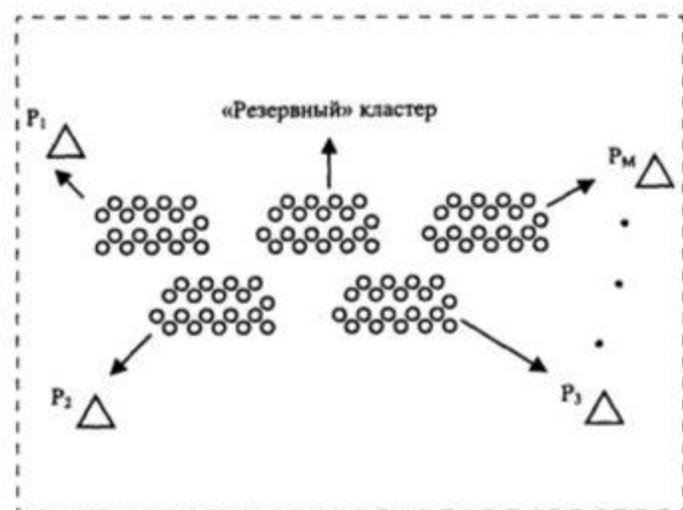


Рис. 4

$$\sum_{i=1}^M n_i < N,$$

т. е. число микроботов, требуемых для обеспечения всех целей из множества P , меньше общего числа микроботов в "туче", то будет образован непустой $(M + 1)$ -й "резервный" кластер (рис. 4). Если же

$$\sum_{i=1}^M n_i > N,$$

то все микроботы "тучи" будут распределены по целям множества P , а $(M + 1)$ -й "резервный" кластер будет пустым. При этом общее время T реализации процедуры кластеризации "тучи" микроботов будет составлять

$$T = N\tau,$$

где N — число микроботов в "туче"; τ — время, отведенное на реализацию алгоритма принятия решения j -м микроботом ($j = 1, N$).

Процесс разбиения "тучи" микроботов на кластеры должен периодически повторяться заново, что позволит "туче" оперативно адаптироваться к изменениям ситуации в среде. Например, если некоторый микробот вышел из строя (или был уничтожен противником), то этот факт будет учтен "тучей" в очередном цикле кластеризации. Действительно, если некоторый микробот R_j вышел из строя, то в отведенный для его решения промежуток времени он не будет передавать другим микроботам "тучи" информацию о номере выбранной им цели. Следовательно, значение элемента c_i^2 массива C_2 (где i — номер цели, которую выбрал

робот R_j в предыдущем цикле кластеризации) у всех микроботов коллектива уменьшится на единицу. В результате данная "вакансия" будет заполнена либо микроботом из "резервного" кластера, либо микроботом, наиболее близко расположенным к данной цели, но не входившим ранее в i -кластер.

Аналогично, если координаты положения целей множества P изменились, то это также будет учтено в очередном цикле кластеризации. При этом состав кластеров может существенно изменяться, поскольку изменяется значение L расстояния между отдельными микроботами "тучи" и целями, но общее число микроботов в каждом кластере будет опять-таки удовлетворять требованию обеспечения соответствующих целей из множества P (конечно, при условии, что

$$\sum_{i=1}^M n_i \leq N).$$

3. Экспериментальные исследования

Для экспериментальной проверки предложенного алгоритма кластеризации "тучи" микроботов была разработана и создана программная модель. Программная модель обеспечивает следующие возможности:

- произвольную расстановку целей множества P (задания их координат);
- динамическое изменение положения целей;
- выведение из строя (уничтожение) некоторых микроботов "тучи".

Эксперименты с программной моделью показали работоспособность и эффективность предложенного подхода. Во-первых, алгоритм принятия решения j -м ($j = 1, N$) микроботом "тучи" очень прост с вычислительной точки зрения, что обеспечивает возможность его реализации в реальном времени с помощью простейшего микропроцессора, располагаемого непосредственно на борту микробота. Во-вторых, периодическая реализация процедуры кластеризации позволяет "туче" оперативно адаптироваться к изменениям ситуации, таким как изменение числа работоспособных микроботов в "туче" и изменение положения целей.

Список литературы

1. Бочаров Л. Ю., Мальцев П. П. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3–6.
2. Рубцов И. В., Нестеров В. Е., Рубцов В. И. Современная зарубежная военная микро- и мини-робототехника // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 36–42.
3. Калыев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Распределенные системы планирования действий коллективов роботов. М.: Янус-К, 2002. 291 с.

УДК 621.3.032.9

О. А. Агеев, канд. техн. наук,
 А. М. Светличный, канд. техн. наук,
 А. Н. Кочеров
 ТРТУ (г. Таганрог)
 E-mail: ageev@tsure.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛАСТИНЕ SiC ПРИ БЫСТРОМ ТЕРМИЧЕСКОМ ИНФРАКРАСНОМ НАГРЕВЕ*

Рассмотрено влияние конструкции нагревателя на распределение облученности, температуры, радиальных и тангенциальных компонент тензора напряжений, критерия дефектообразования по радиусу SiC пластины диаметром 100 мм при быстром ИК нагреве. Определены оптимальные условия нагрева, не приводящие к образованию линейных дефектов.

Карбид кремния является одним из перспективных материалов электронной техники [1]. Успехи в разработке приборов экстремальной электроники на SiC в первую очередь связаны с прогрессом, достигнутым в получении высококачественного SiC диаметром до 100 мм, а также возможностью получения на полупроводниковой подложке SiC нитридных пленок [2, 3]. Это открывает новые возможности и перспективы для массового производства приборов экстремальной электроники и микросистемной техники [3]. Одной из проблем при разработке приборов и микросистем на кремнии и SiC является совместимость технологии изготовления на одной подложке системы управления и механической структуры. Сложность решения этой проблемы объясняется большой длительностью высокотемпературных операций, которые могут оказывать влияние не только на параметры изготовленных приборов, но и на электрофизические свойства самой подложки [4, 5]. В связи с этим разработчики ведут поиск альтернативных методов. Одним из них является быстрая термическая обработка (БТО) полупроводниковых структур импульсными световыми потоками инфракрасного (ИК) диапазона [6, 7]. Преимущество БТО перед другими методами заключается в следующем:

- индивидуальная обработка пластин;

* Работа выполнена в рамках программы "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники", подпрограмма "Электроника", код проекта 208.02.02.020.

- малая длительность высокотемпературных операций;
- микропроцессорная система управления технологическим процессом;
- возможность проведения обработки на воздухе, вакууме или в различных технологических средах;
- малые масса, габаритные размеры и потребляемая мощность технологического оборудования [8].

К недостаткам БТО можно отнести высокие требования к однородности облучения поверхности пластин. Нарушение этих требований при высоких скоростях нагрева и охлаждения может привести к образованию в подложках температурных полей и термоупругих напряжений, которые могут послужить причиной появления дополнительных дефектов в структуре обрабатываемого кристалла. Устранить этот недостаток можно путем оптимизации конструкции реактора и режимов обработки [9].

Целью работы является оптимизация распределения температуры и термоупругих напряжений в 100-миллиметровых подложках SiC при быстром ИК нагреве.

В работах [9, 10] были проведены расчеты перераспределения световых потоков в реакционной камере установки БТО, на их основе была определена конструкция реактора, позволяющая облучать пластины SiC некогерентным ИК излучением с неравномерностью облучения $\pm 1\%$. Однако предварительный анализ показывает, что в полупроводниковых пластинах при БТО формируются температурные поля со значительными градиентами [11]. Это связано с потерями энергии с краев пластины, обусловленными теплоотводом за счет излучения и высоким коэффициентом теплопроводности SiC. Градиенты температуры в пластинах приводят к формированию термоупругих напряжений, которые могут вызвать генерацию дефектов в пластинах при превышении критического напряжения [11, 12].

Анализ результатов расчета облученности [9, 10] показывает, что для оптимальных конструкций реакционной камеры установки БТО наблюдается осевая симметрия распределения световых потоков по поверхности пластины. Следовательно, при анализе температурных полей в пластине SiC при БТО можно использовать распределение температуры по радиусу. Его можно рассчитать, решая уравнение вида [13]

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r K(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + S(r, T, t) \quad (1)$$

с начальным условием $T(r) = T_0$ (при $t = 0$) и граничными условиями

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ при } r = 0;$$

$$-K(T) \frac{\partial T}{\partial r} = \epsilon \sigma_0 [T^4 - T_0^4] + \alpha_k [T - T_{cp}]$$

при $r = R$,

где T — температура; ρ , $C(T)$, $K(T)$ — плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность материала пластины соответственно; ϵ — коэффициент эмиссии; σ_0 — постоянная Стефана—Больцмана; α_k — коэффициент конвективного теплообмена; T_0 , T_{cp} — температура стенок камеры и окружающей среды соответственно; R — радиус пластины; r — текущий радиус.

Функция внутренних источников определяется выражением

$$S(r, T, t) = \frac{1}{d} (Q(r) A_i(T, N) - 2\epsilon \sigma_0 [T^4(r) - T_0^4] - 2\alpha_k [T(r) - T_0]),$$

где d — толщина пластины; $Q(r)$ — облученность пластины.

Считая пластину квазиизотропным телом, находящимся в плосконапряженном состоянии, ненулевые компоненты тензора напряжений, вызванные неоднородным распределением температуры по радиусу пластины, можно рассчитать согласно выражениям [12]

$$\sigma_{rr} = \alpha E \left[\frac{1}{R^2} \int_0^R T(r) r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r) r dr \right]; \quad (2)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \alpha E \left[\frac{1}{R^2} \int_0^R T(r) r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r) r dr - T(r) \right], \quad (3)$$

где α — коэффициент теплового расширения; E — модуль Юнга материала пластины.

На основе методики, изложенной в [11], можно рассчитать результирующие сдвиговые напряжения и, используя критерий дефектообразования KD , изучить влияние режимов термообработки на образование дефектов в пластине:

$$KD = \frac{|\tau|}{\sigma_E}, \quad (4)$$

где τ — результирующие сдвиговые напряжения; σ_E — критическое напряжение пластической деформации.

Монокристаллы 6H-SiC имеют гексагональную кристаллическую структуру с плоскостью скольжения (0001) и направлением скольжения $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ [14, 15] (рис. 1). Поскольку направление роста монокристаллов (0001), то рассчитанные компоненты

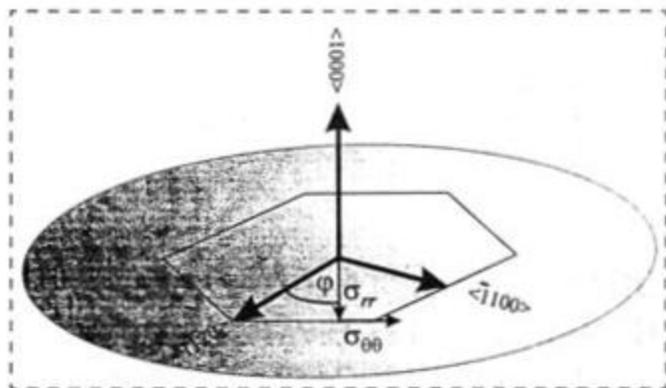


Рис. 1. Система координат для анализа напряжений в пластинах SiC

тензора напряжений определяют результирующие сдвиговые напряжения, которые при превышении критического напряжения вызывают генерацию дислокаций.

Критическое напряжение в сильной степени зависит от температуры и скорости деформации (рис. 2). Эту зависимость можно аппроксимировать выражением [14]

$$\sigma_E(T, \dot{\gamma}) = \exp\left(\frac{U}{nkT} + \frac{1}{n} \ln(\dot{\gamma})\right), \quad (5)$$

где $\dot{\gamma}$ — скорость деформации; k — постоянная Больцмана; n — константа (среднее значение $n = 3,0 \pm 0,7$); U — энергия активации пластической деформации, сильно зависящая от скорости деформации и температуры. В частности, для средних ($\sim 6 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$) и высоких ($> 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$) скоростей деформации при температурах до 1300 °C, а также низких ($< 3 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$) скоростей деформа-

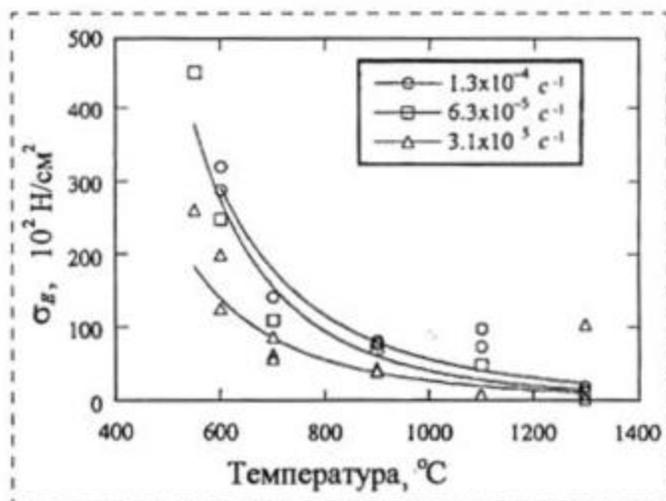


Рис. 2. Зависимость критического напряжения пластической деформации 6H-SiC от температуры для различных скоростей деформации, по данным [14]

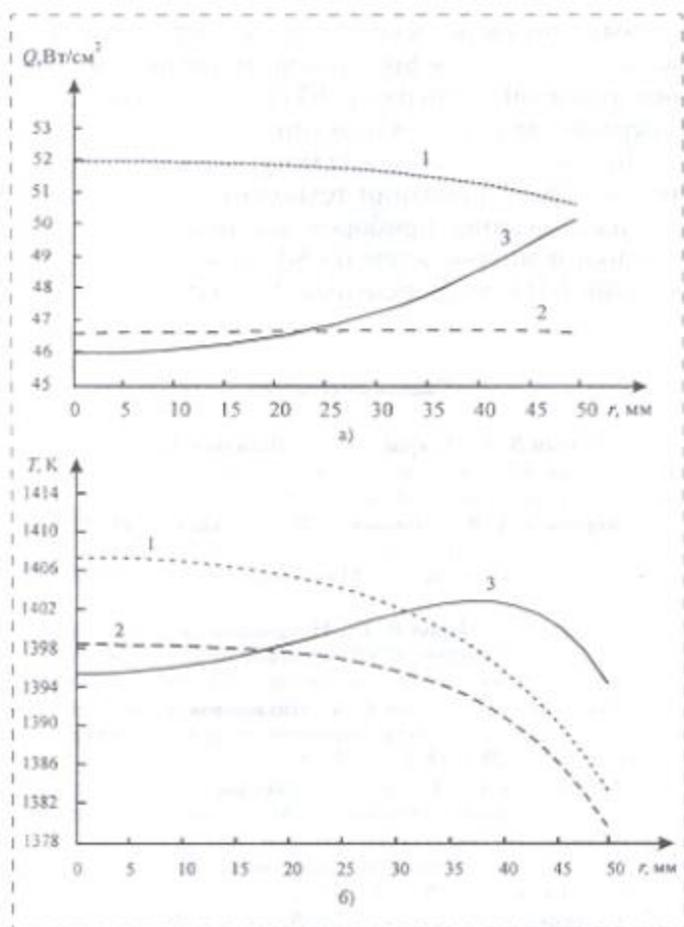


Рис. 3. Распределение облученности (а) и температуры (б) по радиусу пластины SiC при БТО в реакционной камере:

1 — с лампами одинаковой мощности; 2 — обеспечивающей равномерную облученность; 3 — обеспечивающей компенсацию тепловых потерь.

ции при температурах ниже $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ энергия активации составляет $2,1 \pm 0,7\text{ эВ}$, а для низких скоростей деформации при температурах выше $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна $4,5 \pm 1,2\text{ эВ}$ [14].

На рис. 3–5 представлены рассчитанные по изложенной выше модели распределения облученности, температуры, компонент тензора напряжений и критерия дефектообразования по радиусу пластины SiC диаметром 100 мм при БТО для случаев использования в световых панелях ламп одинаковой и различной мощности.

Анализ показывает, что даже при равномерной облученности в пластинах SiC при БТО развиваются значительные температурные градиенты, которые, в отличие от пластин Si при аналогичных режимах БТО, не локализованы вблизи края пластины и вызывают генерацию значительных напряжений. Использование направленных потоков излучения к периферийным областям пластины SiC позволяет снизить температурные градиенты в пластине. При этом существует два возможных ва-

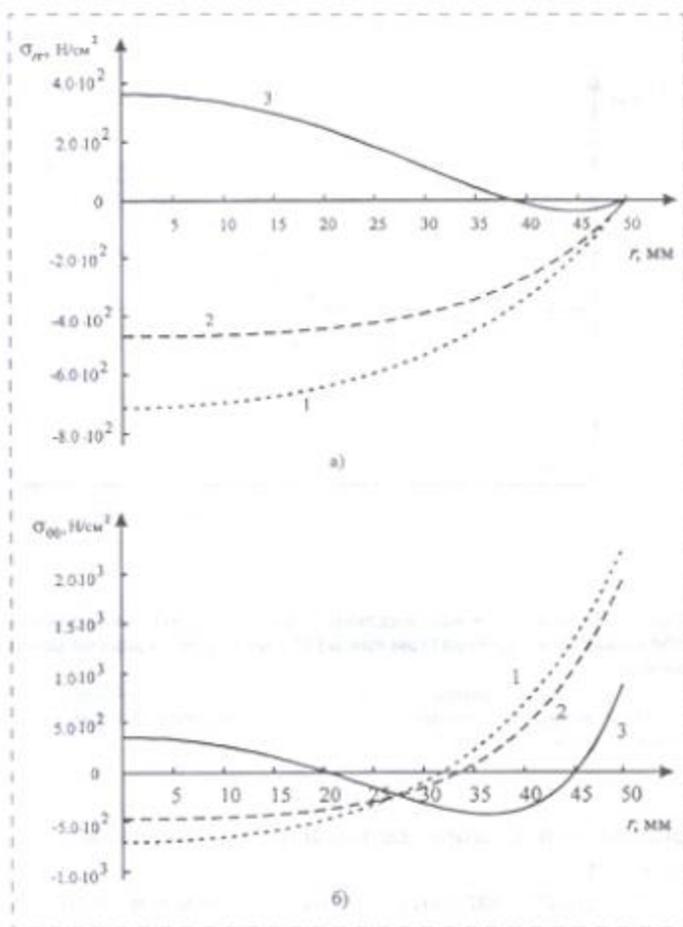


Рис. 4. Распределение радиальных (а) и тангенциальных (б) компонент тензора напряжений по радиусу пластины SiC при БТО в реакционной камере:

1 — с лампами одинаковой мощности; 2 — обеспечивающей равномерную облученность; 3 — обеспечивающей компенсацию тепловых потерь.

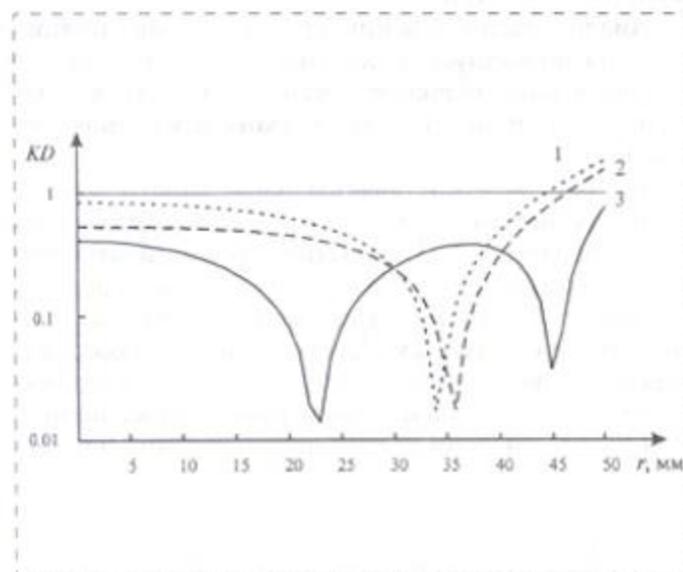


Рис. 5. Распределение критерия дефектообразования по радиусу пластины SiC при БТО в реакционной камере:

1 — с лампами одинаковой мощности; 2 — обеспечивающей равномерную облученность; 3 — обеспечивающей компенсацию тепловых потерь.

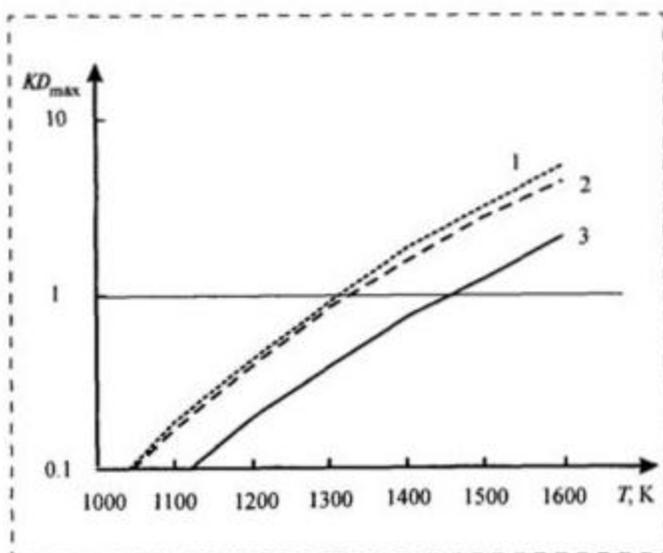


Рис. 6. Зависимости максимальных значений критерия дефектообразования от температуры при БТО пластин SiC в реакционной камере:

1 — с лампами одинаковой мощности; 2 — обеспечивающей равномерную облученность; 3 — обеспечивающей компенсацию тепловых потерь

рианта управления направленными потоками излучения.

В первом варианте мощность ламп в панелях подбирается для обеспечения наиболее равномерной облученности, и в этом случае в пластине наблюдаются достаточно высокие температурные градиенты и напряжения. Во втором варианте мощность ламп в панелях подбирается для обеспечения компенсации тепловых потерь (а значит, и напряжений) в пластине.

Анализ распределения критерия дефектообразования по радиусу пластины показывает, что его максимальное значение достигается на краю пластины, где и будет локализована дефектная область.

На рис. 6 представлены зависимости максимальных значений критерия дефектообразования от температуры БТО пластин 6H-SiC диаметром 100 мм (относительно центра пластины, в режиме теплового баланса), легированных азотом с концентрацией $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, для случаев использования в световых панелях ламп одинаковой и различной мощности. Анализ показывает, что компенсация потерь энергии за счет использования направ-

ленных потоков излучения к периферийным областям пластины SiC позволяет увеличить рабочий диапазон температур БТО, не приводящий к генерации дефектов в пластине.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании технологических процессов изготовления приборов экстремальной электроники и микросистем на SiC на основе использования БТО некогерентным ИК излучением.

Список литературы

1. Лучинин В. В., Таиров Ю. М., Васильев А. А. Особенности материаловедческого и технологического базиса микросистем // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 15–20.
2. Корляков А. В., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Микромеханические структуры на основе композиции "карбид кремния—нитрид алюминия" // Микроэлектроника. 1999. № 3. С. 201–212.
3. Muller St. G., Glass R. C., Hobgood H. M. et al. Progress in the industrial production of SiC substrates for semiconductor devices // Materials Science and Engineering. 2001. B80. P. 327–331.
4. Мальцев П. П., Телец В. А., Никифоров А. Ю. Интегрированные технологии микросистемной техники // Микросистемная техника. 2001. № 1. С. 35–52.
5. Мальцев П. П., Телец В. А., Никифоров А. Ю. Технология и изделия микроэлектроники // Микросистемная техника. 2001. № 10. С. 18–24.
6. Muller St. G., Glass R. C., Hobgood H. M. et al. // Materials Sci. and Eng. 2001. B80. P. 327.
7. Сеченов Д. А., Касимов Ф. Д., Агаев Ф. Г., Светличный А. М., Агеев О. А. Активируемые процессы микроэлектронной технологии. Баку: ЭЛМ. 2000. 258 с.
8. Светличный А. М., Сеченов Д. А. и др. // Электронная промышленность. 1991. № 3. С. 6.
9. Агеев О. А., Светличный А. М., Кочеров А. Н. // Известия ВУЗов. Электроника. 2001. № 1. С. 23.
10. Агеев О. А., Светличный А. М., Кочеров А. Н. Влияние конструкции реакционной камеры на облученность пластин SiC в установке БТО // Сб. тезисов докладов ВНТДК "Электроника", МИЭТ, Зеленоград, 19–30 ноября 2001 г. С. 119–120.
11. Сеченов Д. А., Светличный А. М., Соловьев С. И., Агеев О. А. Влияние скорости нагрева на возникновение термонапряжений в кремниевой пластине при быстром отжиге // Физика и химия обработки материалов. 1992. № 5. С. 46.
12. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. М.: Мир, 1964. 515 с.
13. Agueev O. A., Svetlichnyi A. M. Modeling of 6H-SiC wafer heating during RTP by incoherent radiation // Journal of Materials Processing & Manufacturing Science. 2001. Vol. 9. N 3. P. 223–229.
14. Samant A. V., Zhou W. L., Pirouz P. Effect of test temperature and strain rate on the yield stress of monocrystalline 6H-SiC // Phys. stat. sol. (a) 1998. P. 166, 155–169.
15. Muller St. G., Glass R. C., Hobgood H. M., Tsvetkov V. F., et al. The status of SiC bulk growth from an industrial point of view // Journal of Crystal Growth 2000. 211. P. 325–332.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 543:621.865.8

А. Адамацкий¹, Б. де Лейси Костелло²,
К. Мелхиш¹, Н. Ратклив², Я. Вессницер¹,
Н. Г. Рамбиди³

¹ Факультет вычислительной техники и математики, Университет Запада Англии, Бристоль, Великобритания,

² Кафедра физики и химии, Факультет прикладных наук, Университет Запада Англии, Бристоль, Великобритания,

³ Физический факультет Московского государственного университета, Москва, Россия

УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ НА ОСНОВЕ ХИМИЧЕСКИХ СРЕД ТИПА БЕЛОУСОВА—ЖАБОТИНСКОГО

Обсуждаются исходные принципы и некоторые результаты работ по созданию экспериментальных химических контроллеров для автономных мобильных роботов. При их проектировании были использованы основные свойства пространственно-временной динамики химических реакционно-диффузионных сред: движение волн возбуждения, генерация волн и специфическое волновое взаимодействие. Предложенные прототипы химических контроллеров используют обработку информации реакционно-диффузионными средами, удобство реализации ввода—вывода информации и устойчивость вычислительного процесса, определяющуюся массивным параллелизмом архитектуры среды, т. е. большим количеством параллельно функционирующих вычислительных элементов (микрообъемов) среды. Приведены примеры химических контроллеров для управления движением робота к источнику стимуляции, вычисления кратчайшего пути без столкновения с препятствиями и обработки изображений.

1. Введение

Реакционно-диффузионные, и в том числе химические вычислительные устройства, заняли на протяжении последнего десятилетия устоявшуюся нишу среди других реализаций нестандартных вычислений, таких как квантовые вычисления, вычисления с помощью непрерывных полей, вычисления в моделях коллективов насекомых и т. д. Было показано, что экспериментальные модели химических процессов способны эффективно решать задачи обработки изображения [1–4], вычисления

кратчайших путей в среде с препятствиями [5–7] и реализации логических схем [8–10].

Химические вычислительные устройства, реализованные на основе тонкослойных сред, представляют собой уникальный класс "жидких" параллельных процессоров. В основе их функционирования лежит параллельный ввод исходных данных, т. е. преобразование численной или графической информации в пространственное распределение химических компонентов среды. В этих устройствах осуществляется массивно-параллельная обработка информации. Результатом решения задачи является конечное состояние среды, которое может быть представлено пространственным распределением продуктов реакций в среде и зафиксировано стандартными оптическими устройствами. Возбудимые химические среды, такие как Белоусова—Жаботинского (БЖ), являются химическими и молекулярными аналогами живых однородных нейронных систем, таких как, например, диффузионная нервная система *Нуагогоа* или внутрисеночные нервные сплетения висцеральных органов. Поэтому реакционно-диффузионные химические среды могут рассматриваться не только как искусственные вычислительные устройства, но и как естественные упрощенные прототипы нервной системы.

Ниже будут рассмотрены нестандартные химические контроллеры для мобильных автономных роботов. Сегодня стандартные контроллеры строят на основе кремниевых микросхем и вычисления на них выполняются с использованием стандартной арифметики и логики. Предлагаемые нестандартные контроллеры построены из молекулярных, химических и биологических элементов и в них используются неявные, нецифровые, вычисления, основу которых составляет отображение локальной динамики элементов среды в макроскопические режимы сложной глобальной динамики. До сих пор известны лишь два теоретических направления проектирования нестандартных контроллеров. Первое из них — метаболический контроллер, в котором управляющая система представляет собой метаболическую сеть, связывающую сенсоры, биохимические реакторы и актюаторы [11]. Второе направление использует принципы пространственно-временной динамики возбуждения в нелинейных средах [12–15], включая среды типа Белоусова—Жаботинского.

Среда Белоусова—Жаботинского (БЖ) [16–17] является одной из наиболее изученных, но все еще

загадочных, реакционно-диффузионных сред. Она отличается осциллирующим поведением, когда катализатор реакции (например, ферроин или комплексное соединение рутения) периодически окисляется и восстанавливается. Возбудимая среда имеет одно устойчивое состояние и устойчива к небольшим возмущениям. Однако сверхпороговое возмущение приводит к возбуждению, окислению катализатора. После этого система возвращается в исходное состояние покоя (проходя через состояние рефрактерности, в котором система не чувствительна к стимуляции).

Таким образом, реакционно-диффузионная среда типа Белоусова—Жаботинского является массивно-параллельным вычислителем, каждый микроробот которой — элементарный процессор (конечный автомат).

2. Принципы волнового контроля в химических средах

Предположим, что химическая среда, составляющая основу контроллера, чувствительна к некоторому внешнему стимулу. Тогда каждый приграничный микроробот химической среды возбуждается с вероятностью, пропорциональной интенсивности стимуляции, т. е. пропорционально расстоянию от данного микроробота до источника стимуляции. Если возбудимость среды пороговая, то только участки среды, прилежащие к источнику стимуляции, становятся источниками волновой активности. Обратив векторы скорости порождаемых волн, легко определить относительное направление на источник. Простая сумма инвертированных векторов скоростей волны представляет собой глобальный вектор, указывающий на источник стимуляции. Этот вектор используется как ключевой параметр при изменении пространственной ориентации робота, управляемого химическим реактором. Волны возбуждения порождаются непрерывно в процессе движения робота, а поэтому вектор поступательного движения робота также меняется непрерывно. Так, по крайней мере в идеальном случае, химический контроллер направляет робота к источнику стимуляции, т. е. мишени (рис. 1).

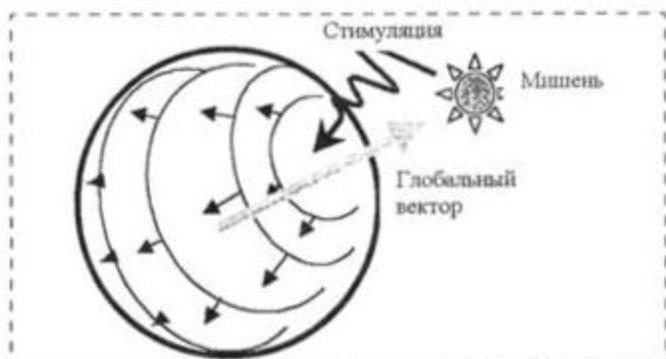


Рис. 1. Схема ориентации химического контроллера на источник стимуляции

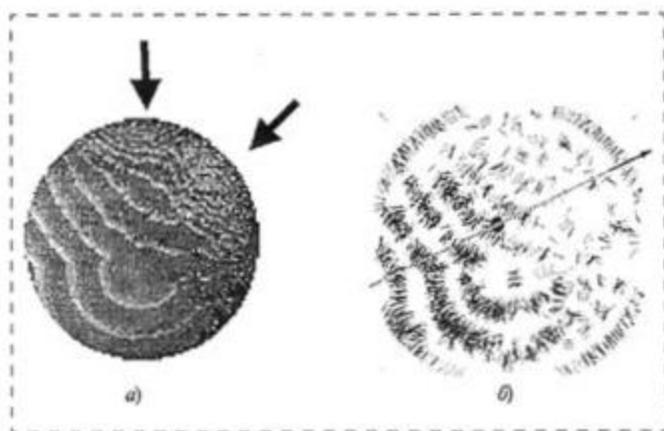


Рис. 3. Вычисление локальных векторов (нормалей волновых фронтов) по образу реакционной среды:

а — источники стимуляции (показаны стрелками), б — конфигурация локальных векторов и глобального вектора, который указывает возможное направление на источник стимуляции

3. Ориентация на источник стимуляции

Принципы волнового контроля были успешно проверены в лабораторных экспериментах, где имитировали автономный робот с тонкослойной управляющей средой Белоусова—Жаботинского. Среда была приготовлена по методике [18], используемой повсеместно при изучении волновых режимов возбудимых химических сред: 7 мл кислотного раствора бромата калия с серной кислотой ($[BrO_3^-] = 0,5 \text{ M}$, $[H^+] = 0,59 \text{ M}$), 3,5 мл 0,5 M раствора малоновой кислоты, 1,2 мл 0,97 M раствора бромида натрия, 1 мл 0,025 M раствора ферроина. Концентрация ионов брома была увеличена для того, чтобы подавить формирование спонтанных источников активности. Реакционная смесь переносилась пипеткой на чашку Петри для формирования жидкого слоя толщиной ~1 мм и встряхивалась для перевода среды в исходное состояние покоя. Для стимуляции источников волновой активности использовался раствор коллоидного серебра, давление которого в локальные фрагменты среды приводит к необратимому удалению ионов брома вследствие формирования бромида серебра. Ионы брома являются первичными ингибиторами автокаталитической активности в среде БЖ и поэтому уменьшение их концентрации приводило к генерации волн активности. Пространственно-временная активность реакционной среды анализировалась в течение часа, каждую минуту регистрировалось изображение среды (рис. 2, см. четвертую сторону обложки), по которому вычислялся глобальный вектор (рис. 3).

Для вычисления глобального вектора использовалась следующая методика. Для каждого пикселя полутонового изображения среды определялся вектор из данного пикселя в локальный максимум яркости соседних пикселей (рис. 3, а). Метод основан на асимметрии фронта волны окисления в тон-

ком слое среды БЖ. Глобальный вектор представляется как сумма локальных векторов (рис. 3, б); направление на источник стимуляции является обратным к глобальному вектору. Таким образом, использованная процедура позволяла восстановить направление на источник стимуляции по единственному изображению волновой среды, что значительно снижает трудоемкость вычисления используемого в предложенном ранее алгоритме временного кодирования волновой активности [5].

Вычисление глобального вектора осуществлялось на стационарном персональном компьютере, который анализировал активность химического реактора. Результаты вычисления передавались роботу по радиоканалу. Робот определял разницу между уже известным и только что полученным векторами ориентации и вычислял угол поворота для движения по направлению к источнику стимуляции. Повернув на заданный угол, робот совершал небольшое поступательное движение, пропорциональное длине вектора ориентации. Несколько фотографий робота, двигающегося по направлению к источнику стимуляции, показаны на рис. 4. Траектория движения робота, управляемого средой БЖ, представлена на рис. 5.

Химический реактор стимулировался лишь дважды в начале эксперимента, динамика реактора не контролировалась в процессе эксперимента.

В экспериментах было выделено три типа поведения робота, которым управлял БЖ-контроллер:

1. *Поиск.* В начале эксперимента робот "не знает", где находится мишень, представленная источником стимуляции, движения робота неуверенны и подчас хаотичны (рис. 5, поз. А). Волны возбуждения только начинают формироваться и двигаться по химической среде (см. рис. 2: 1, 15 и 20 с).

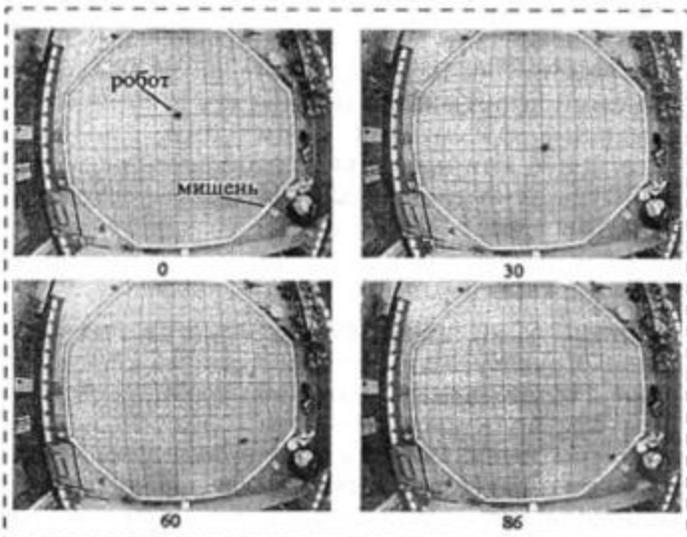


Рис. 4. Фотографии робота, движущегося к "воображаемой" мишени, представленной источником стимуляции химического реактора

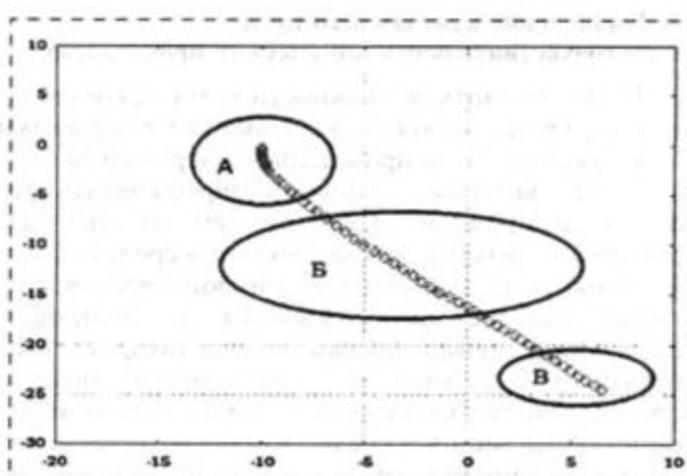


Рис. 5. Схема движения робота, контролируемая динамикой активности в среде Белоусова—Жаботинского. На траектории выделены три режима "поведения" робота:

А — робот "ищет" мишень и его движения неупорядочены; Б — робот "нашел" мишень и уверенно движется в ее сторону; В — робот замедляется и движется "неуверенно" (этот режим соответствует рис. 6, где реактор достиг "предела" своей живучести и потому наполняется пузырьками газов, побочных продуктов химической реакции, что усложняет вычисление локальных векторов)

2. *Преследование.* Волны окисления заполняют реакционное пространство (см. рис. 2: 25 и 30 с), робот определяет местонахождение мишени (рис. 5, поз. В).

3. *Усталость.* Со временем в среде формируются пузырьки CO_2 и через час после начала эксперимента они занимают значительную площадь реактора (рис. 6). Пузырьки приводят к формированию ложных локальных градиентов векторного поля и зашумляют его, что приводит к отклонению вычисляемого вектора от истинного направления на источник стимуляции. Робот замедляется и вращается "без причины" из стороны в сторону (см. рис. 5).

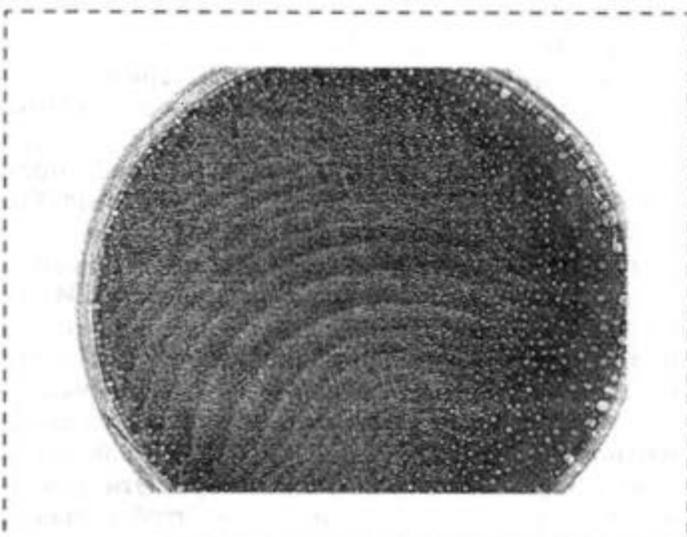


Рис. 6. Усталость химического контроллера — формирование пузырьков в среде Белоусова—Жаботинского

4. Вычисление кратчайшего пути в светочувствительных химических процессорах

Чтобы оценить возможности химического контроллера в задачах планирования пути и обработки изображений, были проведены эксперименты с реактором, в котором реакционно-диффузионная среда катализировалась комплексным соединением рутения. Фотохимические реакции в среде образуют функциональный макро-, микроинтерфейс, который позволяет преобразовывать пространственное распределение видимого света (входное изображение) в соответствующее пространственное распределение химических компонентов реакционно-диффузионной среды. Катализатор иммобилизован в тонком слое силикагеля (0,2 мм толщиной), поэтому контроллер устойчив к случайным толчкам и вибрациям. Реакция происходит на границе твердой фазы и жидкости, содержащей все остальные компоненты реакций Белоусова—Жаботинского.

При проецировании окружения робота на поверхность среды контроллер осуществляет основные операции планирования пути. Это может быть выполнено двумя способами. Первый из них, предложенный в [5, 6], использует возбуждение и распространение триггерных волн. При этом векторы скоростей волн вычисляются по моментальным снимкам среды. Второй способ, описанный в работе [7], основан на использовании фазовых волн. Фазовые волны распространяются независимо от диффузионных вдоль фазовых градиентов возбудимой химической среды. Эти волны быстрее триггерных, но хуже контролируются.

В опытах с потенциальными БЖ контроллерами для роботов было показано, что фазовые процессы в активной химической среде можно контролировать распределением интенсивности освещения. При этом представляется возможным анализировать связность лабиринта (ациклического планарного графа, в настоящих экспериментах) и удалять те пути, которые не ведут к точке назначения. В выполненных экспериментах [7, 4] лабиринт непрерывно проецировался на поверхность среды. Градиент интенсивности освещения был выбран так, чтобы фазовые волны пробегали от стартовой точки до выхода из лабиринта (скорость волны зависит от градиента освещенности). Иначе говоря, фазовые волны были вынуждены двигаться к экстремальным точкам лабиринта. Для того чтобы вычислить оптимальный путь между двумя заданными точками лабиринта, волна возбуждалась в одной из точек и записывалась временная последовательность изображения реактора. Эти изображения обрабатывались численно, чтобы удалить ненужные ветви лабиринта. Схема эволюции среды в процессе вычислений показана на рис. 7 (см. четвертую сторону обложки).

5. "Химическое" зрение для роботов

Как отмечалось выше, среда Белоусова—Жаботинского является массивно-параллельным вычислительным устройством, каждый микрообъем среды является элементарным процессом "химического параллельного компьютера". Это означает, что активные химические среды способны перерабатывать информацию так же, как "классические" параллельные вычислители, например клеточные автоматы [19]. Можно построить, например, "химический экран" (по аналогии с систолическим экраном [2]), где растровое изображение проецируется на массив химических микрообъемов так, что каждому пикселю изображения соответствует единственный микрообъем. Если микрообъем изменяет свое состояние (концентрацию реагентов), то соответствующий ему пиксель также меняет свой цвет. Исходя из этого был разработан экспериментальный дизайн химической системы зрения для роботов [4, 7]. Изображение проецируется на реакционный слой. В результате в химической среде возникает неоднородное распределение фаз колебаний концентраций. Это распределение однозначно представляет изображение. Оно преобразуется в химической среде за счет взаимодействия фазовых или диффузионных волн.

Так, если изображение проецируется на фоточувствительную химическую среду, то микрообъемы, освещение которых превышает некоторый порог, возбуждаются. Волны возбуждения распространяются по среде и взаимодействуют друг с другом. Контролируя параметры генерации и распространения волн, можно реализовать широкий спектр операций обработки изображения, включая контрастирование, оконтуривание и выделение особенностей. Несколько примеров обработки изображения в фоточувствительной реакционно-диффузионной среде [4] представлены на рис. 8 (см. четвертую сторону обложки). Эти примеры показывают, что изменяя контраст исходного изображения (рис. 8, а, б), можно выделить как внешний контур изображения, так и контуры его отдельных фрагментов. Кроме того, проецируя негативное или позитивное изображения, можно добиться усиления локальных характеристик изображения (рис. 8, в).

6. Возможные перспективы

Выше были приведены результаты предварительных экспериментов с химическими контроллерами для управления движением роботов. В будущем предполагается разместить химические контроллеры непосредственно в корпусе робота. Для этого потребуются иммобилизация среды или катализатора на подходящей полимерной матрице. В идеале представляется возможным сформировать возбудимую мембрану или же твердотельную модификацию среды, нечувствительную к внеш-

ним механическим воздействиям, возникающим при движении робота.

Химические контроллеры, обсуждаемые выше, значительно зависят от внешней вычислительной поддержки. Так, например, волновой контроль фототаксиса реализуется с использованием компьютерного вычисления вектора, направленного на источник стимуляции: паттерны активности среды обрабатываются в компьютере и вычислительный вектор передается обратно на "силикагелевый" контроллер робота. Химические контроллеры были бы намного более эффективны, если бы они управляли актюаторами типа электроактивных полимеров [21] или pH-чувствительных гелей [22]. Так было бы, например, элегантно связать напрямую реакционно-диффузионную среду с автономными актюаторами, выполненными из хемо- или магнеточувствительных полимеров, и создать, таким образом, нечто подобное ресничным одноклеточным организмам.

Такой подход получил уже экспериментальное подтверждение в работе О. Табаты с сотрудниками [23], которые связали светочувствительную БЖ среду с массивом ресничек, сформированных из pH-чувствительного геля. В этой работе микроагрегат конических ресничек, сформированных из изопропилакриламидного геля, был насыщен раствором бипиридила рутения (катализатора БЖ-реакции). При погружении массива в реакционный раствор наблюдалось зарождение волн возбуждения и их распространение в массиве геля. Волны окисления распространялись по гелю, изменяли гидрофильные и гидрофобные свойства полимера и инициировали сжатие/растяжение гелевых рес-

ничек. Вследствие особенностей экспериментальной реализации координированное движение ресничек не приводило к движению массива геля. Тем не менее возможность такого движения была продемонстрирована в вычислительном эксперименте [14] (рис. 9).

Список литературы

1. Kuhnert L., Agladze K. L. and V. I. Krinsky. Image processing using light-sensitive chemical waves // *Nature*. 1989. 337. P. 244–247.
2. Rambidi N. G., Maximychev A. V., Usatov A. V. Molecular image processing based on chemical reaction systems. 1. Implementation of Blum-type algorithm // *Adv. Materials Optics Electron*. 1994. 4. P. 191–201.
3. Rambidi N. G., Maximychev A. V., Usatov A. V. Molecular image-processing devices based on chemical reaction systems. 2. Implementation of Blum-type algorithm // *Adv. Materials Optics Electron*. 1994. 4. P. 191–201.
4. Рамбиди Н. Г., Гребенников Е. П., Адамацкий А. И., Девятков А. Г., Яковенчук Д. В. Биомолекулярные нейросетевые устройства. ИПРЖР. 2002.
5. Steinbock O., Toth A. and Showalter K. Navigating complex labyrinths: optimal paths from chemical waves // *Science*. 1995. 267. 868–871.
6. Agladze K., Magome N., Aliev R., Yamaguchi T. and Yoshikawa K. Finding the optimal path with the aid of chemical wave // *Physica D*. 1997. 106. P. 247–254.
7. Rambidi N. G., Yakovenchuk D. Chemical reaction-diffusion implementation of finding the shortest path in a labyrinth. *Phys. Rev*. 2001. E 63, 026607.
8. Tóth A., Showalter K. Logic gates in excitable media // *J. Chem. Phys*. 1995. N 103. P. 2058–2066.
9. Adamatzky A. Computing in Nonlinear Media and Automata. Collectives. Bristol: IoP Publishing. 2001.
10. Adamatzky A., Ed. Collision-Based Computing. Berlin—London: Springer—Verlag. 2002.
11. Zeigler J., Dittrich P., Banzhaf W. Towards a metabolic robot controller // *Information Processing in Cells and Tissues*. New York: Plenum Press. P. 305–318.
12. Adamatzky A., Holland O., Rambidi N. G., Winfield A. Wet artificial brains: Towards the chemical control of robot motion by reaction-diffusion and excitable media // *Lecture Notes in Computer Science*. 1999. N 1674. P. 304–313.
13. Adamatzky A., Melhuish C. Parallel controllers for decentralized robots: toward nano design *Kybernetes*. 2000. N 29. P. 733–745.
14. Adamatzky A., Melhuish C. Phototaxis of mobile excitable lattices // *Chaos, Solito & Fractals*. N 13, P. 171–184.
15. Adamatzky A., De Lacy Costello B., Melhuish C., Ratcliffe N. Experimental reaction-diffusion chemical processors for robot path planning // *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2003. (in press).
16. Zaikin A. N., Zhabotinsky A. M. Concentration wave propagation in two-dimensional liquid-phase self-oscillating system // *Nature*. 1970. N 225. P. 535.
17. Филд Р., Бургер М. Колебания и бегущие волны в химических системах. М.: Мир, 1988.
18. Field R., Winfree A. T. Travelling waves of chemical activity in the Zaikin—Zhabotinsky—Winfree reagent // *J. Chem. Education*. 1979. N 56. P. 754.
19. Preston K., Duff M. Modern Cellular Automata. Theory and Applications // Plenum Press. 1984.
20. Dehne F., Hassenklover A. L., Sack J. R., Santoro N. Computation geometry algorithms for the systolic screen // *Algorithmica*. 1991. N 6. P. 734–761.
21. Kennedy B., Melhuish C., Adamatzky A. Biologically inspired robots // Y. Bar-Cohen (Ed.) *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles — Reality, Potential and Challenges*, SPIE Press. 2001.
22. Yoshida R., Yamaguchi T., Uchijo H. Novel oscillating swelling-deswelling dynamic behaviour for pH-sensitive polymer gels // *Materials Science and Engineering*. 1996. C4. P. 107–113.
23. Tabata O., Hirasawa H., Aoki S., Yoshida R., Kokufuta T. Ciliary motion actuator using self-oscillating gel // *Sensors and Actuators*. 2002. A 95. P. 234–238.

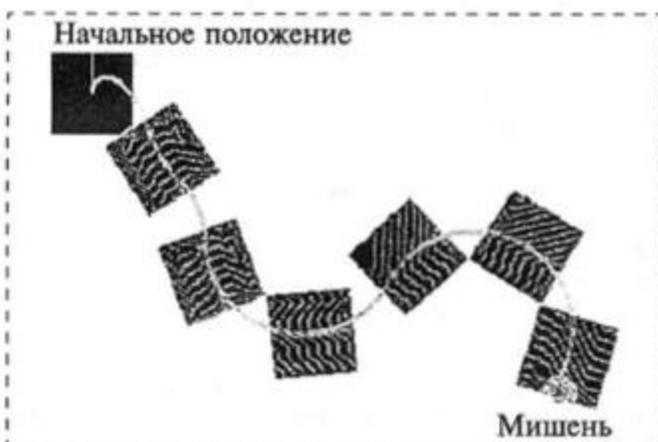


Рис. 9. Траектория движения массива гелевых ресничек, контролируемых средой Белоусова—Жаботинского. На рисунке показано несколько "моментальных" снимков возбудимой среды. Динамика сокращений ресничек повторяет динамику волновой активности в среде. Гелевый робот моделировался на двумерном клеточном автомате, каждая клетка которого является возбудимым элементом и локально связана с восемью ближайшими соседями. Каждая клетка массива управляет своей собственной ресничкой, направление биения которой определяется динамикой возбуждения в ближайшей окрестности клетки. Эта модель подробно обсуждается в [9]

Д. А. Усанов, д-р физ.-мат наук, проф.,
Заслуженный деятель науки РФ,
А. В. Скрипаль, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Саратовский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского
E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИЙ МИКРООБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ*

Приведены результаты измерений характеристик вибрирующих микрообъектов методами голографической и спекл-интерферометрии, гетеродинной, гомодинной и автодинной интерферометрии. Установлена возможность регистрации неоднородных объектов, сложных периодических движений, а также колебательных движений отдельных органов биологических объектов. Показана возможность определения нанометровых вибраций с помощью широкополосной автодинной измерительной системы на полупроводниковом лазере.

Задача регистрации и восстановления параметров механических движений является актуальной из-за возрастающего числа объектов, у которых эти параметры являются основными их характеристиками. Это могут быть как объекты технического назначения, так и биологические объекты. Необходимость в определении резонансных частот и пространственной картины распределения амплитуд колебаний возникает, например, при контроле вибростойкости изделий электронной техники [1, 2]. При этом необходимо учитывать, что в некоторых случаях отдельные части вибрирующих элементов могут совершать колебания как на собственной частоте всего изделия, так и на собственных частотах, значительно превышающих собственные частоты изделия в целом [3, 4].

В работе [5] в качестве объектов таких исследований служили микросхемы типа K198 и K573РФ. Вибрационное возбуждение осуществлялось с помощью пьезокерамического столбика, частоты колебаний которого задавались генератором звуковых колебаний. При нахождении резонансных частот был использован метод пятнистых картин [6, 7], а пространственная картина распределения амплитуд определялась голографическим методом усреднения во времени [8, 9]. Интерферограммы собственных колебаний микросхем, полученные на разных частотах, свидетельствовали о том, что кроме собственных колебаний микросхем в целом суще-

ствуют собственные колебания их отдельных элементов. Так, у микросхем типа K573РФ наблюдались собственные колебания прозрачного корпуса, амплитуда которых в несколько раз превышала амплитуду колебаний керамического основания, а у микросхем типа K198 — собственные колебания кристалла микросхемы, интерферограммы которого были получены с помощью голографического микроскопа с тридцатикратным увеличением [4].

Возможность применения результатов обработки интерференционных картин вибрирующих объектов для выработки рекомендаций по повышению вибростойкости изделий электронной техники была показана на примере исследования вибрационных характеристик СВЧ смесителя в гибридно-интегральном исполнении [10]. Были получены интерферограммы распределения амплитуды колебаний закрепленной по периметру прямоугольной платы с нанесенными на нее элементами СВЧ схемы. Для уменьшения влияния механических вибраций звуковых частот на амплитуду паразитной модуляции выходного сигнала изменялось расположение выводов схемы смесителя относительно оси, проходящей через середины больших сторон платы. Асимметричное расположение выводов схемы позволило обеспечить наличие на плате больших зон с относительно малыми амплитудами колебаний. Размещение элементов СВЧ схемы, особенно чувствительных к вибрационным нагрузкам, в зонах с малыми амплитудами колебаний и освобождение от СВЧ элементов зон с большими амплитудами вибраций позволили уменьшить паразитную модуляцию выходного сигнала промежуточной частоты на 20 дБ.

Интерференционные измерительные системы могут быть использованы также для диагностики совершающих механические колебания биологических объектов [11, 12]. Создано значительное число измерительных интерференционных систем с использованием оптоволоконной техники [13, 14]. Широкий спектр применения интерференционных систем для контроля характеристик вибраций обусловлен возможностью осуществления с их помощью бесконтактной диагностики с высокой разрешающей способностью.

В работе [15] проведен анализ влияния неоднородностей в виде включений из материала другого типа на интерференционную картину колебаний тонких пластин. Показан вклад различных типов колебаний в формирование интерференционной картины для различных положений неоднородности. Выявлен характер изменения собственной частоты и интерференционной картины колебаний при изменении местоположения неоднородности. Установлены закономерности, связанные с вкладом нескольких типов колебаний в формирование интерференционной картины для различных

* Работа выполнена в рамках проекта подпрограммы "Электроника". Код — 208.06.01.009.

положений неоднородности. Исследовано влияние параметров материала и расположения пучностей колебаний объекта в целом на границах неоднородности на интерференционные картины самих неоднородных участков.

Наиболее полную информацию о параметрах вибрирующих структур можно получить с помощью голографических методов, основанных на записи волнового фронта, рассеиваемого структурой [7—9]. Анализ характера интерференционной картины в голографической интерферометрии для объекта, подвергающегося вибрационному возбуждению, проводился в основном для случаев гармонических вибраций и в меньшей степени для случаев, когда объект участвует одновременно в комбинации известного числа отдельных колебаний как на кратных, так и на некратных частотах. Это связано с тем, что при исследовании колебаний объектов методами голографической интерферометрии возникает неопределенность при оценке количества и вида зависимых движений, что не позволяет в полной мере воспользоваться результатами теоретического анализа при экспериментальных исследованиях.

Последние достижения в технологиях получения и обработки изображений изменили характер анализа картины интерференционных полос, получаемых тем или иным голографическим методом (методом двойной экспозиции, усреднением во времени и др.). Стали широко применяться телевизионные системы и компьютерная техника для автоматического анализа фазы, зашифрованной в картине полос, что значительно расширило возможности голографической интерферометрии [5, 17]. В этом случае телевизионная камера заменяет фотографический материал. Замена фотопластины телевизионной камерой, во-первых, позволяет избежать многих трудностей, связанных с процессом проявления, и во-вторых, телевизионная камера обеспечивает наблюдение интерференционной картины в почти реальном времени. Дальнейший анализ интерференционных полос можно проводить соответствующим методом, который применяется в обычной голографической интерферометрии. Например, в [18, 19] измерения амплитуд гармонических вибраций проводились голографическим методом с усреднением во времени, в котором фотопластина заменена телевизионной камерой. В [20, 21] для исследования параметров гармонических колебаний применена методика двухимпульсной стробоскопической голографии, в которой регистрация интерференционной картины также осуществлялась телевизионной камерой. Авторами [22, 23] было проведено исследование гармонических вибраций объекта методом сравнительной голографии с одновременной записью одной телевизионной камерой интер-

ференционных картин от тестового и исследуемого объектов.

Одним из методов, обеспечивающих измерение смещений объектов с неоднородной формой поверхности, является электрооптическая голография, основанная на недавних достижениях в фазосдвигающей голографической интерферометрии, спекл-метрологии и компьютерной технологии и позволяющая выполнить прямую электронную запись голограмм и передачу голографических интерферограмм с помощью телевизионных систем для анализа интерференционных полос в реальном времени [24, 25].

В фазосдвигающей голографической интерферометрии вибрирующих объектов сложение волновых лучей получают в схеме интерферометра, который позволяет сдвигать фазу опорного луча. Выход телевизионной камеры соединен с ЭВМ, позволяющей хранить и обрабатывать последовательность интерференционных картин со сдвигом фазы в опорном луче. Таким образом, формируется несколько кадров изображения объекта с разными значениями фазы опорного луча [26—28]. В случае низкого контраста интерференционных полос и высокого уровня шума хорошие результаты для анализа картины полос может дать Фурье-преобразование фазосдвинутых интерферограмм [29—31]. Однако необходимость регистрации для одного положения объекта нескольких интерференционных картин с разными фазами опорного луча приводит к тому, что данный метод не позволяет следить за непрерывным движением объекта (восстанавливать движение объекта).

Параметры движения отражателя могут исследоваться с помощью гетеродинных методов измерений, в которых используются опорное и зондирующее излучения [32, 33]. Большую группу среди гетеродинных систем составляют лазерные доплеровские измерители скорости [34—36]. Регистрация доплеровского сдвига частоты зондирующего излучения по сравнению с опорным дает информацию о скорости движения отражателя. При реализации в лазере дополнительно эффекта автодинного детектирования можно определять направление движения объекта (приближается или удаляется объект от наблюдателя) по форме наклона осциллограммы автодинного сигнала, протектированного фотоприемником [37—40].

Использование одного источника излучения, работающего на двух частотах, упрощает измерительную систему. В работах [41, 42] для исследования параметров синусоидальных колебаний применялся один двухмодовый газовый лазер с внутрирезонаторным приемом излучения, отраженного от исследуемого объекта. Излучение одной из мод служило в качестве опорного, а другой — в качестве

зондирующего сигнала. Амплитуду гармонических колебаний можно определять двумя способами:

- по девиации частоты межмодовых биений, вызванной доплеровским смещением частоты зондирующего сигнала [42];
- по отношению центральной и боковой гармоник сигнала, снятого с фотоприемника, на котором смешиваются опорное и зондирующее излучения [41].

В последнее время создано большое число интерференционных измерительных систем с использованием полупроводниковых лазеров. Во многом это обусловлено высоким КПД и хорошими модуляционными характеристиками полупроводниковых лазеров, а также их миниатюрностью. Возможность эффективного управления длиной волны с помощью тока накачки послужила основой для создания активных гетеродинных интерферометров на полупроводниковых лазерах. Однако применение гетеродинных методов ограничивается трудностью их конструктивного исполнения и высокими требованиями к их механической стабильности, что связано с использованием двух источников когерентного излучения [43—45].

Параметры колебаний объектов можно определять с помощью гомодинных методов измерения [32, 34]. Преимуществом таких методов исследования является достаточная простота измерительной системы, реализуемой, как правило, по схемам интерферометров Майкельсона, Тваймана—Грина, Маха—Цендера. Движение отражателя в одном из плеч интерферометра приводит к изменению разности фаз между интерферирующими лучами, и на выходе интерферометра регистрируется косинусоидальная функция этого сдвига фаз.

При виброударном нагружении характер наблюдаемого интерференционного сигнала и соответствующий спектр (рис. 1) в общем случае связаны с неоднородным возбуждением периодических и затухающих волн как в отдельных его компонентах, так и во всем объекте в целом. Интерференционный сигнал, представленный на рис. 1, получен при квазипериодических движениях отражателя, вызванных характером работы шагового двигателя ДШИ-200-1.

Прямое определение параметров движения отражателя из-за сложности зарегистрированного интерференционного сигнала затруднено [32, 46]. Кроме того, восстановление формы движения отражателя связано с восстановлением фазы волнового фронта, а непосредственно измеряемой в эксперименте величиной является распределение интенсивности в плоскости регистрации. Поэтому основной задачей при использовании гомодинной методики измерений является создание способов дешифровки зарегистрированного сигнала. Вопрос дешифровки интерференционного сигнала можно

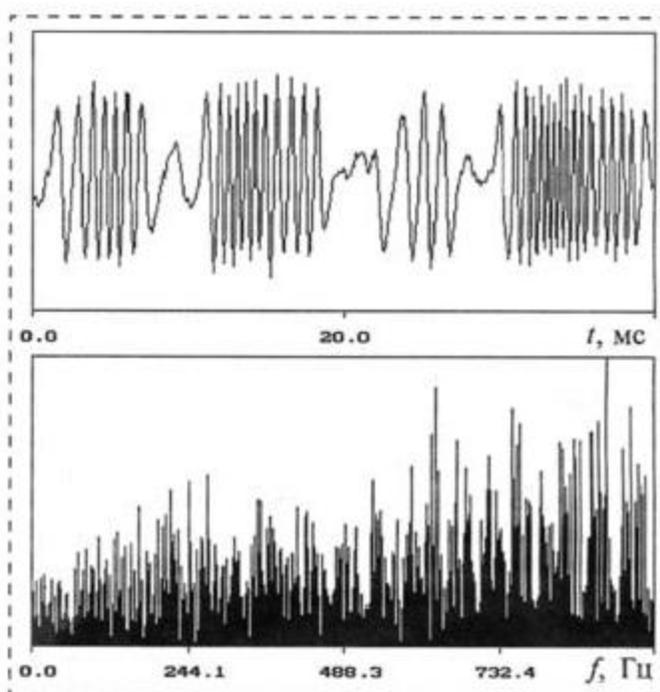


Рис. 1. Интерференционный сигнал и спектр, полученные при квазипериодических движениях шагового двигателя ДШИ-200-1

рассматривать как решение обратной задачи [47]. Прямая задача в физической оптике заключается в исследовании характеристик излучения, если заданы характеристики источников излучения и отражателей. Под обратной задачей понимается, например, задача нахождения по параметрам регистрируемого интерференционного сигнала месторасположения отражателей. Можно выделить два подхода к решению обратной задачи. В первом из них устанавливаются формулы или алгоритмы, которые позволяют по картине интерференции восстанавливать характеристики отражателей. Во втором подходе задается характерная модель, описывающая связь параметров излучения с характеристиками отражателя, и затем методом подбора неизвестных параметров добиваются соответствия теоретической и экспериментальной зависимостей.

Для восстановления параметров движения отражателя было разработано несколько способов дешифровки зарегистрированного интерференционного сигнала. Авторы [48] для определения амплитуды колебания преобразуют интерференционный сигнал и получают четную и нечетную функции интенсивности интерференционного сигнала. Из проведенных в [48] оценок следует, что минимальная амплитуда вибрации, детектируемая с использованием предлагаемой методики, составляет величину порядка $\lambda/50$.

В основе большинства лазерных гомодинных методов для измерения амплитуды синусоидальных колебаний ξ положена прямая пропорциональная зависимость, связывающая амплитуды

спектральных составляющих выходного сигнала детектора с функциями Бесселя соответствующих порядков $J_m\left(\frac{4\pi\xi}{\lambda}\right)$. Используя эту связь, результа-

ты измерений и решая соответствующую обратную задачу, определяют ξ . Благодаря указанной зависимости можно использовать закономерности, присущие функциям Бесселя [49—52], для обработки интерференционного сигнала. Снять ограничения на диапазон измеряемых амплитуд гармонических вибраций, присущих методам [49—52], позволяет метод [53, 54], основанный на одновременном использовании разложений интерференционного сигнала в ряды Фурье и Бесселя.

Способ определения амплитуды гармонического колебания, превышающего длину волны источника когерентного излучения, описан в [55]. В работе выявлена линейная зависимость, связывающая амплитуду колебаний отражателя и номер составляющей спектра сигнала на выходе интерферометра, имеющей максимальное значение. Предлагаемая зависимость позволяет по спектру сигнала фотодетектора оценить амплитуду гармонического колебания. Методы решения обратных задач восстановления характеристик колеблющихся объектов по интерференционному сигналу рассматривались в [56, 57]. В работе [58—60] приведены результаты разработки методов восстановления функции движения объектов при сложном движении отражателя.

Особую актуальность развитие гомодинной интерферометрии анализа параметров движений объекта приобрело в связи с применением для измерений автодинных систем. Оптические автодинные системы, основанные на использовании эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых лазерах, сочетают в себе функции генератора и детектора электромагнитной волны одновременно. Однако в таких системах, в отличие от интерференционных систем с развязкой от источника излучения, не всегда можно использовать известные методы восстановления формы движения объекта. Это связано с возможностью существенного отличия формы автодинного сигнала от интерференционного сигнала при наличии развязки с источником когерентного излучения [61, 62].

Исследование закономерностей изменения амплитудно-фазовых параметров волновых полей может быть использовано и при изучении биологических объектов. В ряде работ [63—70] приведены результаты исследований возможности использования методов интерферометрии в измерениях биовибраций и в задачах кардиодиагностики. В работах [64, 66] исследован механизм формирования выходного сигнала спекл-интерферометра для анализа вибраций поверхности кожи и биотканей. Результаты теоретического исследования зависимо-

сти структуры фазовых портретов выходного сигнала спекл-интерферометра биовибраций поверхности кожи от тяжести сердечно-сосудистых заболеваний приведены в [65].

Практический интерес могут представлять результаты исследований биовибраций глаза. Использование сочетания телевизионной регистрации местоположения глаза с компьютерным анализом его изображения позволило разработать новые методы регистрации саккадических движений глаза [71, 72]. При обычном анализе нистагма, или произвольных ритмических движений, движение глаза регистрируется с помощью методов электроокулографии или фотоэлектрической нистагмографии [71, 73]. Микропроцессорная обработка сигнала с выхода оптоэлектронной системы [74] позволяет регистрировать нистагм, появляющийся при неврологических заболеваниях, при заболевании внутреннего уха, при врожденной патологии органа зрения, что может быть использовано для их диагностики [75, 76].

Наиболее трудно решаемой задачей является диагностика микросаккадических движений глаза (известных под названием тремор глаза), амплитуда которых не превышает нескольких микрометров. В отличие от фотоэлектрических методов, в которых ротационное движение глаза регистрируется по интенсивности рассеянного светом [77], интерференционные методы анализа позволяют измерять колебания глаза, нормальные к его передней поверхности (возвратно-поступательное движение). Для диагностики такого вида саккадических движений был применен полупроводниковый лазерный автодин, высокая чувствительность которого к перемещениям обусловлена реализацией фазового метода измерений.

Для оценки степени загрязнения окружающей среды широкое применение находят методы, основанные на оценке физиологических параметров биологических тест-объектов. К таким тест-объектам для контроля состояния водной среды относятся пресноводные рачки — дафнии (*Daphnia magna* Straus), поскольку известна высокая чувствительность их физиологических параметров к концентрации токсических компонентов в водной среде [78, 79]. Была показана сильная зависимость периода биений сердца дафнии от концентрации гидрохинона в водном растворе [78] и установлено влияние концентрации фенола на частоту дыхания дафнии [79].

Колебательные движения совершает также глаз дафнии, расположенный в передней части головы и обладающий значительной подвижностью [80]. При нормальных условиях глаз дафнии совершает колебания в диапазоне частот 6—15 Гц, причем отдельные гармоники колебаний глаза совпадают с частотой сердцебиения.

Экспериментальные исследования колебательных движений различных органов дафнии проводились на установке, схема которой приведена на рис. 2. Излучение источника света 1 фокусировалось линзой 2 в область органов дафнии 3, помещенной в канал 4 на прозрачном столике 6. В стакан 5 заливалась водная среда обитания дафний, в которую опускались электроды 7, соединенные с источником напряжения U . Для фиксации момента захвата частоты колебаний, например глаза дафнии, частотой внешнего электрического сигнала использовался микроскоп 13. Часть излучения, отраженного от светоделительной пластинки 8, направлялась на фотодетектор 9. Сигнал с фотодетектора поступал через усилитель 10 и аналого-цифровой преобразователь 11 в компьютер 12. После регистрации осциллограммы колебаний вычислялся спектр протектированного сигнала с помощью метода быстрого преобразования Фурье.

На рис. 3 приведены осциллограммы движений глаза дафнии и их спектры, полученные для случая собственных движений глаза (рис. 3, а) и при возникновении явления синхронизации этих движений внешним электрическим полем (рис. 3, б). Как видно на рис. 3, а, в спектре сигнала выделяются гармоники с частотами 4,5; 9; 13 и 18 Гц, причем максимальной амплитудой обладает гармоника с частотой 13 Гц. При возникновении явления синхронизации, как видно на рис. 3, б, характер движения глаза становится близким к гармоническому (с частотой синхросигнала, равной 8 Гц) с небольшой модуляционной составляющей, обусловленной, по-видимому, тремором.

В работе [63] исследовалась возможность увеличения числа информативных параметров, характе-

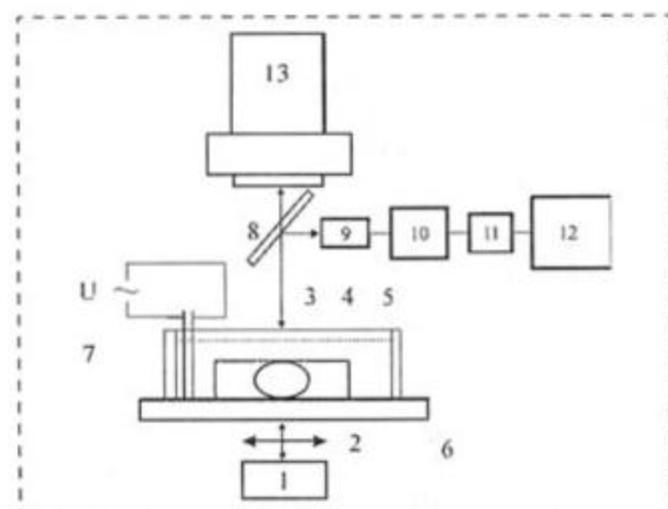


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — источник света; 2 — линза; 3 — орган дафнии; 4 — прозрачный канал; 5 — стакан; 6 — прозрачный столик; 7 — электроды; 8 — светоделительная пластинка; 9 — фотодетектор; 10 — усилитель; 11 — аналого-цифровой преобразователь; 12 — компьютер; 13 — микроскоп

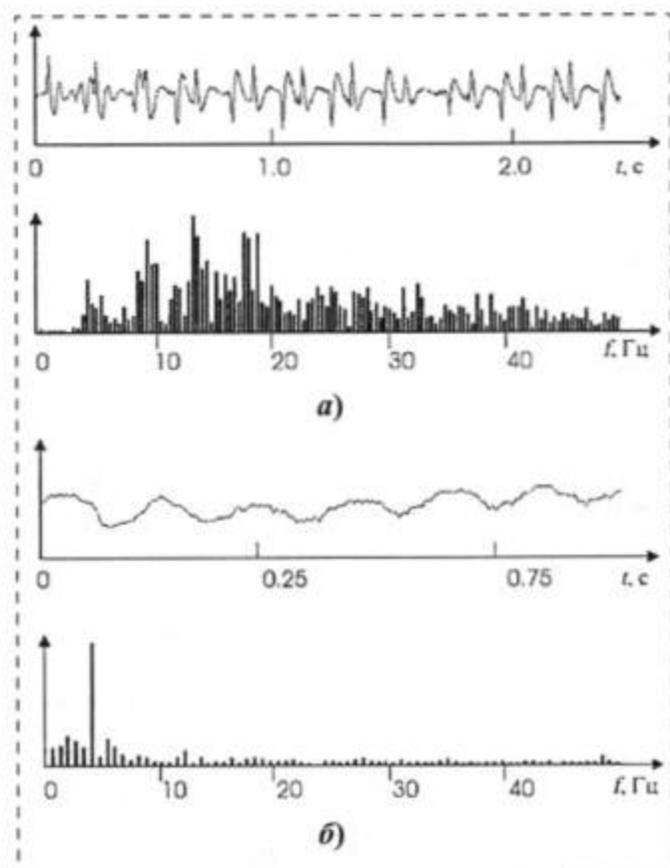


Рис. 3. Осциллограммы движений глаза дафнии и их спектры, полученные для случая собственных движений глаза (а) и при возникновении явления синхронизации этих движений внешним электрическим полем (б)

ризирующих поведение дафний в токсичной среде, в результате использования полупроводникового лазерного автодина, обладающего высокой чувствительностью и возможностью реализации фазового метода измерений при конструктивной простоте и пониженных требованиях к механической стабильности регистрирующей системы. С помощью лазерной автодинной системы регистрировались амплитуда и форма протектированного сигнала, по характеру которых определялась степень токсичности водной среды. Частота сердцебиения дафнии определялась по основной частоте гармоники спектра протектированного сигнала, а амплитуда колебаний — по набору спектральных гармоник [81]. Рассчитанная по результатам измерений протектированного сигнала зависимость мгновенных значений смещения сердца дафнии от времени приведена на рис. 4. Из результатов проведенных исследований следует, что при наличии фенола в водной среде амплитуда биений сердца дафнии составила 0,2 мкм, что существенно меньше амплитуды биений сердца дафнии в отсутствие фенола (0,35 мкм).

Одним из актуальных применений полупроводниковых лазерных измерительных систем является

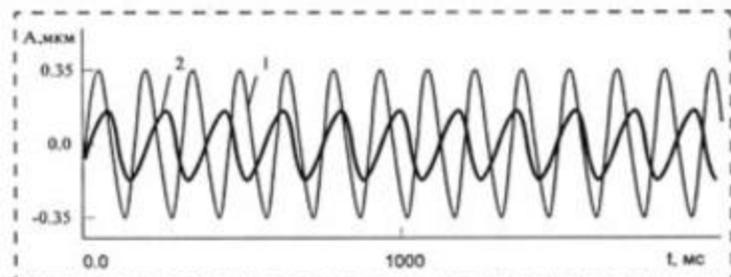


Рис. 4. Восстановленная форма биений сердца дафнии:
1 — при отсутствии токсикантов в водной среде; 2 — при наличии фенола в водной среде (концентрация 5 мг/л)

контроль параметров нанометровых вибраций и перемещений, необходимый при разработке современных микросистем и нанотехнологий. На рис. 5 приведена схема аводинной измерительной системы на полупроводниковом лазере. В качестве источника полупроводникового автодина использовался лазерный диод RLD-650(5) с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой на квантоворазмерных структурах со следующими характеристиками: мощность излучения 5 мВт, длина волны 652 нм, пороговый ток 20 мА. Излучение полупроводникового лазера 1, стабилизированного источником тока 6, направлялось на объект 2, закрепленный на пьезокерамике 3, колебания которой возбуждались генератором звуковых колебаний 5. Возможность перемещения колеблющегося объекта обеспечивалась микрометрическим механизмом 4. Часть излучения, отраженного от объекта, возвращалась в резонатор полупроводникового лазера, изменение выходной мощности которого регистрировалось фотодетектором 11. Сигнал с фотодетектора поступал через усилитель 9, содержащий широкополосный фильтр переменного сигнала 10, на вход аналого-цифрового преобразователя 8 компьютера 7.

Для измерений амплитуд колебаний отражателя в единицах и долях нанометров использовалось из-

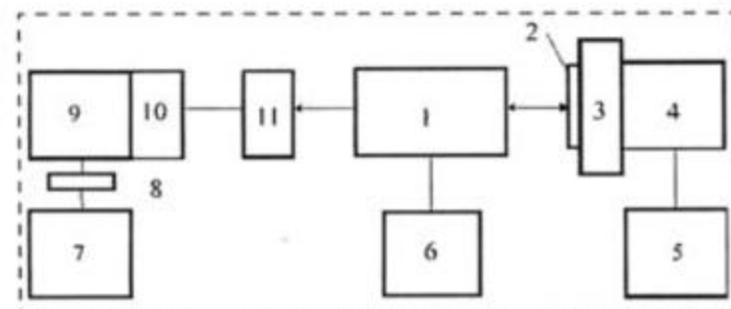


Рис. 5. Схема аводинной измерительной системы на полупроводниковом лазере:

1 — полупроводниковый лазер; 2 — отражатель; 3 — пьезокерамика; 4 — микрометрический механизм; 5 — генератор звуковых колебаний; 6 — источник тока; 7 — компьютер; 8 — аналого-цифровой преобразователь; 9 — усилитель; 10 — широкополосный фильтр; 11 — фотодетектор

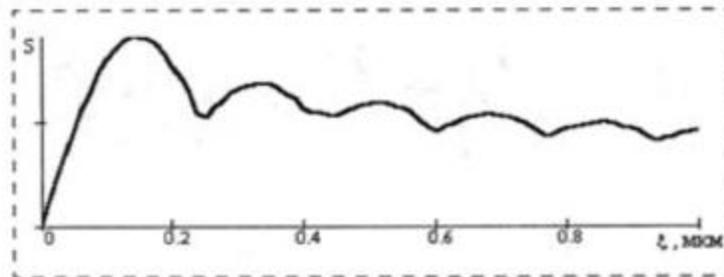


Рис. 6. Зависимость максимального спектрального значения амплитуды гармоники от амплитуды колебаний объекта

вестное разложение сигнала в ряд по функциям Бесселя [11, 61]

$$P(t) = \cos\theta J_0(\sigma) + 2\cos\theta \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\sigma) \cos[2n\omega t + \varepsilon] - 2\sin\theta \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\sigma) \cos[(2n-1)\omega t + \varepsilon]. \quad (1)$$

Как видно из выражения (9), автодинный сигнал состоит из постоянной компоненты $\cos\theta J_0(\sigma)$, гармоники на основной частоте и составляющих на более высоких гармониках основной частоты. Для гармонических колебаний объекта амплитуды спектральных составляющих выходного сигнала детектора прямо пропорциональны функциям Бесселя $J_{2n}(\sigma)$ и $J_{2n-1}(\sigma)$ и связаны с ними соотношениями

$$\begin{aligned} S_1 &= 2J_1(\sigma) \sin\theta; & S_2 &= 2J_2(\sigma) \cos\theta; \\ S_3 &= 2J_3(\sigma) \sin\theta; & S_4 &= 2J_4(\sigma) \cos\theta; \\ S_{2n-1} &= 2J_{2n-1}(\sigma) \sin\theta; & S_{2n} &= 2J_{2n}(\sigma) \cos\theta. \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 6 приведена теоретическая зависимость максимального спектрального значения амплитуды гармоники от амплитуды колебаний объекта. Как видно из этой зависимости, наблюдается четко выраженный максимум на кривой, значение которого позволяет использовать приведенную зависимость в качестве нормировочной зависимости.

Для определения неизвестного значения амплитуды колебаний отражателя ξ по нормировочной зависимости (рис. 6) использовалось соотношение четных или нечетных амплитуд спектральных гармоник вида

$$\frac{S_x}{S_{m \text{ nor}}} = \frac{J_1\left(\frac{4\pi}{\lambda} \xi_x\right)}{J_m\left(\frac{4\pi}{\lambda} \xi_{\text{nor}}\right)}, \quad (3)$$

где S_x — амплитуда спектральной гармоники на известной амплитуде колебаний отражателя ξ_x ; $S_{m \text{ nor}}$ — амплитуда спектральной гармоники на известной амплитуде колебаний отражателя ξ_{nor} ; J_m — функция Бесселя порядка m .

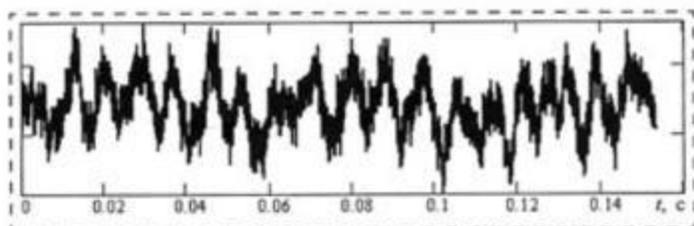


Рис. 7. Измеренный автодинный сигнал для нанометровых амплитуд вибраций объекта

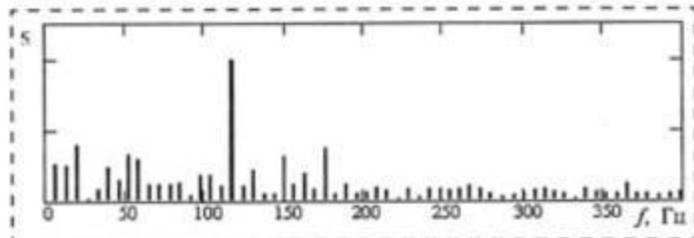


Рис. 8. Спектральное представление нанометровых амплитуд вибраций объекта

На рис. 7 и 8 приведены измеренный протектированный фотоприемником сигнал и спектральный ряд для искомой (неизвестной) амплитуды колеблющегося объекта. По спектру, приведенному на рис. 7, была определена амплитуда гармоники спектрального ряда на частоте колебаний объекта, которая составила $S_x = 0,3931$ отн. ед.

Для получения нормировочной зависимости объект подвергали дополнительному воздействию механических колебаний на частоте, равной частоте колебаний объекта. По достижении гармоники спектрального ряда на частоте колебаний объекта максимального значения фиксировали ее значение. По значению амплитуды колебаний объекта в точке максимума зависимости, приведенной на рис. 6 (при $\xi_{nor} = 0,15$ мкм), с использованием соотношения (11) была вычислена амплитуда колебаний объекта, которая оставила $\xi_x = 1,02$ нм. Измерение амплитуд меньших значений ограничивалось шумами установки, приведенной на рис. 5.

Было установлено, что предложенная автодинная измерительная система на полупроводниковом лазере позволяет контролировать амплитуду вибраций объекта в диапазоне от 1 до 10000 нм в полосе частот от единиц герц до сотен мегагерц.

Список литературы

1. Вышемирский А. В., Седельников В. А. Когерентно-оптические методы измерения параметров механических колебаний // *Обзоры по электронной технике. Сер. 1 Электроника СВЧ*. М.: ЦНИИ "Электроника", 19789. Вып. 15. 61 с.
2. Горбатенко Б. Б., Клименко И. С., Рабкин В. Б., Рябухо В. П., Сурменко Л. А. Применение лазерной интерферометрии для контроля технологии изделий электронной техники // *Обзоры по электронной технике. Сер. 7. М.: ЦНИИ "Электроника", 1987. Вып. 5. 56 с.*

3. Усанов Д. А., Тупикин В. Д., Вагарин А. Ю., Куренкова О. Н., Скрипаль А. В. Голографическая микроскопия // *Обзоры по электронной технике. Сер. 8. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания*. М.: ЦНИИ "Электроника", 1991. Вып. 1. 75 с.

4. Усанов Д. А., Куренкова О. Н., Скрипаль А. В. Применение голографического микроскопа для исследования колебаний микро неоднородностей // *Дефектоскопия*. 1985. № 5. С. 92–94.

5. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Телевизионная измерительная микроскопия. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1996. 139 с.

6. Вышемирский А. В., Софинский Б. А. Применение эффекта пятнистости для бесконтактного вибрационного анализа элементов СВЧ и квантовых приборов // *Обзоры по электронной технике. Сер. 8. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания*. М.: ЦНИИ "Электроника", 1975. Вып. 8. 54 с.

7. Jones R., Wykes C. Holographic and speckle interferometry. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1989.

8. Островский Ю. И., Бутусов М. М., Островская Г. В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 339 с.

9. Holographic interferometry / by Ed. P. K. Rastogi — Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, 1994. 328 p.

10. А. с. 1450073 СССР МКИ Н 03 Д 9/02. СВЧ устройство / Д. А. Усанов, О. Н. Куренкова, А. В. Скрипаль, С. С. Горбатов, А. Н. Абрамов. Опубл. Бюл. № 1. 1989.

11. Ulyanov S. S., Ryabukho V. P., Tushin V. V. Speckle interferometry for biotissue vibration measurement // *Opt. Eng.* 1994. V. 33. N 3. P. 908–914.

12. Skripal A. V., Usanov D. A. Semiconductor laser interferometry of eye movement // *Proc. SPIE*. 2000. Vol. 3908. P. 7–12.

13. Балаев В. И., Мишин Е. В., Пятахин В. И. Волоконно-оптические датчики параметров физических полей // *Квантовая электроника*. 1984. Т. 11. № 1. С. 10–30.

14. Бусурин В. И., Семенов А. С., Удалов Н. П. Оптические и волоконно-оптические датчики // *Квантовая электроника*. 1985. Т. 12. № 5. С. 901–944.

15. Куренкова О. Н., Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Свободные колебания тонких пластин с неоднородностями // *Проблемы прочности*. 1984. № 8. С. 95–98.

16. Chen F., Griffen C. T., Allen T. E. Digital speckle interferometry: some developments and applications for vibration measurement in the automotive industry // *Opt. Eng.* 1998. V. 37. P. 1390–1397.

17. Rustad R. Phasor-difference method for measuring the amplitude and the phase of small-amplitude vibrations with TV holography // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. P. 5383–5393.

18. Rosvold G. O., Lokberg O. J. Effect and use of exposure control in vibration analysis using TV holography // *Appl. Opt.* 1993. V. 32. P. 684–691.

19. Spooren R. Double-pulse subtraction TV holography // *Opt. Eng.* 1992. V. 31. P. 1000–1007.

20. Doval A. F., Fernandez J. L., Perez Amor M., Valera J. D. R., Jones J. D. C. Contrast enhanced and phase controlled stroboscopic additive fiber optic TV-holography for whole field out-of-plane vibration analysis // *Optics and Lasers in Engineering*. 1996. V. 25. P. 323–342.

21. Saldner H. O., Mohan N. K., Molin N. E. Comparative TV holography for vibration analysis // *Opt. Eng.* 1995. V. 34. P. 486–492.

22. Rastogi P. K., Barillot M., Kaufmann G. H. Comparative phase shifting holographic interferometry // *Appl. Opt.* 1991. V. 30. P. 722–728.

23. Takeda M., Ina H., Kobayashi S. Fourier transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry // *J. Opt. Soc. Am.* 1982. V. 72, N 1. P. 156–160.

24. Yamaguchi I., Okamoto T., Nagayama H. Performance of a spatial filtering detector applied to a speckle displacement sensor // *Meas. Sci. Technol.* 1990. V. 1. P. 406–412.

25. Dyrseth A. A., Skatter S. Vibration analysis of logs with electronic speckle pattern interferometry // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. P. 3649–3656.

26. Saldner H. O. Phase-stepped television holographic technique for measuring phase and amplitude maps of small vibrations // *Appl. Opt.* 1996. V. 35. P. 3791–3798.
27. Tlingsrud S., Rosvold G. O. Analysis of a data-based TV-holography system used to measure small vibration amplitudes // *JOSA A-Optics and Vision*. 1992. V. 9. P. 237–251.
28. Vikhagen E. Vibration measurement using phase shifting TV-holography and digital image processing // *Opt. Commun.* 1989. V. 69. P. 214–218.
29. Lu B., Hu Z., Abendroth H., Eggers H., Ziolkowski E. Improvement of time-average subtraction technique applied to the vibration analysis with TV-holography // *Opt. Commun.* 1990. V. 78. P. 217–221.
30. Morimoto Y., Fujisawa M. Fringe pattern analysis by a phase-shifting method using Fourier transform // *Opt. Eng.* 1994. V. 33, N 11. P. 3709–3714.
31. Saldner H. O., Molin N. E., Stetson K. A. Fourier-transform evaluation of phase data in spatially phase-biased TV holograms // *Appl. Opt.* 1996. V. 35. P. 332–336.
32. Коронкевич В. П., Соболев В. С., Дубинцев Ю. Н. Лазерная интерферометрия. Новосибирск: Наука, 1983. 212 с.
33. Протопопов В. В., Устинов Н. Д. Лазерное гетеродинамирование. М.: Наука, 1985. 288 с.
34. Клочков В. П., Козлов Л. Ф., Потыкевич И. В., Соскин М. С. Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия: Справочник / Под ред. М. С. Соскина. Киев: Наукова думка, 1985. 70 с.
35. Маргин А. В. Доплеровский измеритель скорости на основе инжекционного лазера // *ЖТФ*. 1994. Т. 64. Вып. 1. С. 184–189.
36. Сытин В. А., Чмутин А. М. Лазерный виброметр с прямой обработкой доплеровского сигнала // *Изв. вузов. Приборостроение*. 1991. № 7. С. 68–72.
37. Shimizu E. T. Directional discrimination in the self-mixing type laser Doppler velocimeter // *Appl. Opt.* 1987. V. 26. P. 4541–4544.
38. Koelink M. H., Slot M., F. F. de Mul, et al. Laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a fiber-coupled semiconductor laser: theory // *Appl. Opt.* 1992. V. 31. P. 3401–3408.
39. Jentink H. W., F. F. de Mul, et al. Small laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in diode laser // *Appl. Opt.* 1988. V. 27. P. 379–385.
40. Shinohara S., Mochizuki A., Yoshida H., Sumi M. Laser Doppler velocimeter using the self-mixing effect of a semiconductor laser diode // *Appl. Opt.* 1986. V. 25. P. 1417–1419.
41. Анципенко М. Л., Ермаченко В. М., Головаченко А. М., Курочкин В. Ю., Наумов Н. В., Пуртовский В. Н., Проценко Е. Д. Регистрация малых колебаний объектов с использованием внутрирезонаторного приема излучения двухмодового газового лазера // *Квантовая электроника*. 1991. Т. 18. № 5. С. 653–654.
42. Козин Г. И., Петров В. В., Проценко Е. Д. Детектирование отраженного излучения по частоте биений двухмодового лазера // *Квантовая электроника*. 1991. Т. 18. № 3. С. 391–393.
43. Lin Y. J., Pan C. L. Precision displacement by active laser heterodyne interferometry // *Appl. Opt.* 1991. V. 30. P. 1648–1652.
44. Fisher E., Dalhoff E., Heim S., Hofbauer U., Tiziani H. J. Absolute interferometric distance measurement using FM-demodulation // *Appl. Opt.* 1995. V. 34. P. 5589–5594.
45. Suzuki T., Sasaki O., Maruyama T. Absolute distance measurement using wavelength-multiplexed phase-locked laser diode interferometry // *Opt. Eng.* 1996. V. 35. P. 492–497.
46. Usanov D. A., Skripal A. V., Usanova T. V. New coherence methods of micro-object parameter measurements and arrangements for their realization // *Proc. SPIE*. 2001. V. 4242. P. 187–200.
47. Обратные задачи в оптике: Пер. с англ. / Под ред. Г. П. Болта. М.: Машиностроение, 1984. 200 с.
48. Wei Jin, Uttamchandani D., Culshaw B. Direct readout of dynamic phase changes in a fiber-optic homodyne interferometer // *Appl. Opt.* 1992. V. 31. P. 7253–7258.
49. Sudarshanam V. S., Srivasan K. Linear readout of dynamic phase change in a fiber-optic homodyne interferometer // *Opt. Lett.* 1989. V. 14. P. 140–142.
50. Defferari H. A., Darby R. A., Andrews F. A. Vibration Displacement and Mode-Shape Measurement by a Laser Interferometer // *J. Acoust. Soc. Am.* 1967. V. 42. P. 982–997.
51. Ohtsuka Y. Dynamic measurements of small displacements by laser interferometry // *Trans. Inst. Measure. Control*. 1982. N 4. P. 115–124.
52. Vikram C. S., McDevitt T. E. Simple spectrum analysis in laser Doppler studies of sinusoidal vibrations // *Opt. Eng.* 1989. V. 28. P. 922–925.
53. Pernick B. J. Self-consistent and direct reading laser homodyne measurement technique // *Appl. Opt.* 1973. V. 12. P. 607–610.
54. Wei Jin, Zhang L. M., Uttamchandani D., Culshaw B. Modified J_1 - J_2 method for linear readout of dynamic phase change in a fiber-optic homodyne interferometer // *Appl. Opt.* 1991. V. 30. P. 4496–4499.
55. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Вагарин В. А. Определение амплитуды колебаний оптическим гомодинамным методом по высшим гармоникам // *ПТЭ*. 1994. № 6. С. 612–615.
56. Гангнус С. В., Скрипаль А. В., Усанов Д. А. Определение параметров движений объекта с помощью оптического гомодинамного метода // *Автометрия*. 1999. № 1. С. 31–37.
57. Kalinkin M. Yu., Usanov D. A., Skripal A. V. Determination of mechanical vibration from of external reflector by response of autodyne interference system based on a semi-conductor laser // *Proc. SPIE*. 1999. V. 3726. P. 49–51.
58. Gangnus S. V., Skripal A. V., Usanov D. A. Nonharmonic vibration amplitude measurement by spectral homodyne method // *Photonics and Optoelectronics*. 1997. V. 3. N 4. P. 167–172.
59. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Гангнус С. В. Решение обратной задачи для восстановления параметров сложного периодического движения в лазерной гомодинамной системе // *Автометрия*. 2001. № 1. С. 117–122.
60. Gangnus S. V., Usanov D. A., Skripal A. V. Characteristics determination of complicated motion of object by homodyne interference system // *Proc. SPIE*. 1999. V. 3726. P. 226–232.
61. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Калинкин М. Ю. Формирование автодинамного сигнала в полупроводниковом лазере при движении внешнего отражателя // *Изв. вузов. Сер. Прикладная нелинейная динамика*. 1998. Т. 6. № 1. С. 3–9.
62. Скрипаль А. В., Усанов Д. А., Вагарин В. А., Калинкин М. Ю. Автодинамное детектирование в полупроводниковом лазере при движении внешнего отражателя // *ЖТФ*. 1999. Т. 69. Вып. 1.
63. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Вагарин А. Ю., Скрипаль А. В., Потапов В. В., Шмакова Т. Т., Мосияш С. С. Лазерная автодинамная интерферометрия динамических параметров биообъектов // *Письма в ЖТФ*. 1998. Т. 24. Вып. 5. С. 39–43.
64. Ul'yanov S. S., Ryabukho V. P., Tuchin V. V. Speckle interferometry for biotissue vibration measurement // *Opt. Eng.* 1994. V. 33. N 3. P. 908–914.
65. Ульянов С. С., Тучин В. В. Получение фазовых портретов кардиовибраций человека с помощью спекл-интерферометрии // *Изв. вузов. Сер. Прикладная нелинейная динамика*. 1994. Т. 2. № 3–4. С. 44–53.
66. Ul'yanov S. S., Ryabukho V. P., Tuchin V. V. Speckle interferometry in the measurements of biotissues vibrations // *Proc. SPIE: Holography, Interferometry and Optical Pattern Recognition in Biomedicine II*. 1992. V. 1647. P. 125–136.
67. Браун У. Лазерный интерферометр для измерения движения хрусталика глаза крысы in vivo под действием микроволнового излучения // *Приборы для научн. исслед.* 1983. № 1. С. 91–95.
68. Fercher A. F., Hu H. Z., Steeger P. F., Briers J. D. Eye deformation measurement by laser interferometry // *Opt. Acta*. 1982. V. 29. N 10. P. 1401–1406.
69. Wellemin J.-F., Khanna S. M., Dandliker R. Heterodyne interferometer for cellular vibration measurement // *Acta Oto-laryngologica*. 1989. V. 467. P. 35–42.

70. Teich M. C., Khanna S. M., Keilson S. E. Nonlinear dynamics of cellular vibrations in the organ of corti // Acta Oto-laryngologica. 1989. V. 467. P. 265—279.

71. Becker W. Metrics // Neurobiology saccadic eye movements. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989. P. 13—68.

72. Микропроцессорные медицинские системы: Проектирование и применение / Под. ред. У. Томпкинса и Дж. Узбстера. М.: Мир, 1983. 544 с.

73. Аванин В. Ф. Теоретические основы иридологии. М.: ЛЭТМО, 1993. 351 с.

74. Michaels D. L., Tole J. R. A microprocessor-based instrument for nystagmus analysis // Proc. IEEE, 1977. V. 65. P. 730—735.

75. Thorn G. W., Adams R. D., Braunwald E., Isselbacher K. J., Petersdorf R. G. (eds.) Harrison's principles of internal medicine. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 1977.

76. Склют И. А., Цемахов С. Г. Нистагм. Минск: Высшая школа, 1990. 240 с.

77. Митрани Л. Саккадические движения глаз и зрение. София, Изд-во Болгарской Академии наук, 1973. 168 с.

78. Кикнадзе Г. С., Есаков Б. П., Кузьминых С. Б., Комаров В. М. Опыт оценки степени загрязнения водной среды по изменению периода биения сердца дафнии. Пушкино: Научный центр биологических исследований АН СССР, 1983. 13 с.

79. Колупаев Б. И., Андреев А. А., Самойленко Ю. К. Оптический метод регистрации сердечного ритма у дафний // Гидробиологический журнал. 1977. Т. 13. Вып. 3. С. 119—120.

80. Скрипаль А. В., Усанов А. Д. Синхронизация движений глаза дафнии внешним электрическим полем // Изв. вузов. Сер. Прикладная нелинейная динамика. 2000. Т. 8. № 3. С. 27—30.

81. Usanov D. A., Skripal A. V., Usanov A. D., Skripal An. V., Abramov A. V. Laser diagnostics of daphnia oscillations // Proc. SPIE. 2001. V. 4241. P. 25—31.

ЧЛАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 539.216

А. В. Ландышев, канд. техн. наук,
Л. В. Бигюцкая,
А. Т. Козаков, д-р физ.-мат. наук,
Ростовский НИИ радиосвязи

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВЫМИ МЕТОДАМИ

Методами оже-спектроскопии и рентгеноспектрального микроанализа исследована поверхность поли- и монокристаллического образца состава $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$. Обнаружена зависимость технологического углерода от преимущественной ориентации кристаллитов сплава. Более интенсивно углерод насыщает поверхности сплава, параллельные усилию прессования.

В настоящей работе методами электронно-зондового анализа был исследован сплав на основе $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$, который используется в качестве основного рабочего материала p -типа проводимости в термоэлектрических преобразователях различных типов и назначения [1]. Для коммутирования этого сплава в термопары применяют висмут, сурьму и сплавы на их основе, которые наносят на поверхность термоэлектрического материала в виде жидкого припоя или напыляют, например, термовакуумным способом. Исследования показывают, что скорость диффузии висмута в твердом растворе $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2(\text{Se}, \text{Te})_3$ может существенно зависеть от технологии очистки поверхности термоэлектрического материала [2, 3]. С этим согласуются наши результаты рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) ветвей термопар $(\text{Bi}_{0,48}\text{Sb}_{1,52}\text{Te}_3$

и $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0,9}\text{Se}_{0,1})_3$), для коммутирования которых применяли припой $\text{Bi}-\text{Sb}$. Было установлено, что применяемый в этих термоэлементах тонкий (несколько микрометров) промежуточный слой никеля (Ni) между сплавами $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2(\text{Se}, \text{Te})_3$ и припоем не является сплошным, и на контакте образуются пустоты размерами в несколько десятков микрометров. Это может быть, в частности, связано с окислением поверхностных зерен сплавов, что в дальнейшем приводит к несплошности нанесения барьерных слоев Ni , влияет на электропроводность сплава $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ [4]. В связи с этим представляет интерес более детальное исследование примесей на поверхности твердых растворов и их возможное влияние на адгезию барьерных слоев и скорость диффузии. Этот вопрос имеет особо важное значение для технологии производства термобатарей мощностью несколько десятков микроватт и микрохолодильных устройств, у которых сечения ветвей составляют $0,5-1,5 \text{ мм}^2$.

В качестве объекта исследования был выбран сплав состава $\text{Bi}_{0,24}\text{Sb}_{1,76}\text{Te}_3$, приготовленный прессованием порошка сплава (размер частичек не более $0,4 \text{ мкм}$) при температуре $350 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $0,5 \text{ ГПа}$ на воздухе. При прессовании подобных сплавов в них формируется текстура в результате того, что кристаллиты располагаются преимущественно плоскостями спайности перпендикулярно усилию, прикладываемому при прессовании. Существование преимущественной ориентации подтверждалось рентгеноструктурными исследованиями. Для учета фактора ориентации исследовались обе поверхности сплавов (параллельные и перпендикулярные усилию прессования). Для количественной оценки преимущественной ориентации зерен использовали вес текстуры P_{hkl} для плоскостей hkl , определяемый по значениям интенсивностей рефлексов J_{hkl} на рентгенограммах по формуле:

70. Teich M. C., Khanna S. M., Keilson S. E. Nonlinear dynamics of cellular vibrations in the organ of corti // *Acta Oto-laryngologica*. 1989. V. 467. P. 265—279.

71. Becker W. Metrics // *Neurobiology saccadic eye movements*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989. P. 13—68.

72. Микропроцессорные медицинские системы: Проектирование и применение / Под. ред. У. Томпкинса и Дж. Узбстера. М.: Мир, 1983. 544 с.

73. Аванин В. Ф. Теоретические основы иридологии. М.: ЛЭТМО, 1993. 351 с.

74. Michaels D. L., Tole J. R. A microprocessor-based instrument for nystagmus analysis // *Proc. IEEE*, 1977. V. 65. P. 730—735.

75. Thorn G. W., Adams R. D., Braunwald E., Isselbacher K. J., Petersdorf R. G. (eds.) *Harrison's principles of internal medicine*. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 1977.

76. Склют И. А., Цемахов С. Г. Нистагм. Минск: Высшая школа, 1990. 240 с.

77. Митрани Л. Саккадические движения глаз и зрение. София, Изд-во Болгарской Академии наук, 1973. 168 с.

78. Кикнадзе Г. С., Есаков Б. П., Кузьминых С. Б., Комаров В. М. Опыт оценки степени загрязнения водной среды по изменению периода биения сердца дафнии. Пушкино: Научный центр биологических исследований АН СССР, 1983. 13 с.

79. Колупаев Б. И., Андреев А. А., Самойленко Ю. К. Оптический метод регистрации сердечного ритма у дафний // *Гидробиологический журнал*. 1977. Т. 13. Вып. 3. С. 119—120.

80. Скрипаль А. В., Усанов А. Д. Синхронизация движений глаза дафнии внешним электрическим полем // *Изв. вузов. Сер. Прикладная нелинейная динамика*. 2000. Т. 8. № 3. С. 27—30.

81. Usanov D. A., Skripal A. V., Usanov A. D., Skripal An. V., Abramov A. V. Laser diagnostics of daphnia oscillations // *Proc. SPIE*. 2001. V. 4241. P. 25—31.

ЧЛАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 539.216

А. В. Ландышев, канд. техн. наук,
Л. В. Бигюцкая,
А. Т. Козаков, д-р физ.-мат. наук,
Ростовский НИИ радиосвязи

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВЫМИ МЕТОДАМИ

Методами оже-спектроскопии и рентгеноспектрального микроанализа исследована поверхность поли- и монокристаллического образца состава $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$. Обнаружена зависимость технологического углерода от преимущественной ориентации кристаллитов сплава. Более интенсивно углерод насыщает поверхности сплава, параллельные усилию прессования.

В настоящей работе методами электронно-зондового анализа был исследован сплав на основе $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$, который используется в качестве основного рабочего материала p -типа проводимости в термоэлектрических преобразователях различных типов и назначения [1]. Для коммутирования этого сплава в термопары применяют висмут, сурьму и сплавы на их основе, которые наносят на поверхность термоэлектрического материала в виде жидкого припоя или напыляют, например, термовакуумным способом. Исследования показывают, что скорость диффузии висмута в твердом растворе $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2(\text{Se}, \text{Te})_3$ может существенно зависеть от технологии очистки поверхности термоэлектрического материала [2, 3]. С этим согласуются наши результаты рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) ветвей термопар $(\text{Bi}_{0,48}\text{Sb}_{1,52}\text{Te}_3$

и $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0,9}\text{Se}_{0,1})_3$), для коммутирования которых применяли припой $\text{Bi}-\text{Sb}$. Было установлено, что применяемый в этих термоэлементах тонкий (несколько микрометров) промежуточный слой никеля (Ni) между сплавами $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2(\text{Se}, \text{Te})_3$ и припоем не является сплошным, и на контакте образуются пустоты размерами в несколько десятков микрометров. Это может быть, в частности, связано с окислением поверхностных зерен сплавов, что в дальнейшем приводит к несплошности нанесения барьерных слоев Ni , влияет на электропроводность сплава $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ [4]. В связи с этим представляет интерес более детальное исследование примесей на поверхности твердых растворов и их возможное влияние на адгезию барьерных слоев и скорость диффузии. Этот вопрос имеет особо важное значение для технологии производства термобатарей мощностью несколько десятков микроватт и микрохолодильных устройств, у которых сечения ветвей составляют $0,5-1,5 \text{ мм}^2$.

В качестве объекта исследования был выбран сплав состава $\text{Bi}_{0,24}\text{Sb}_{1,76}\text{Te}_3$, приготовленный прессованием порошка сплава (размер частичек не более $0,4 \text{ мкм}$) при температуре $350 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $0,5 \text{ ГПа}$ на воздухе. При прессовании подобных сплавов в них формируется текстура в результате того, что кристаллиты располагаются преимущественно плоскостями спайности перпендикулярно усилию, прикладываемому при прессовании. Существование преимущественной ориентации подтверждалось рентгеноструктурными исследованиями. Для учета фактора ориентации исследовались обе поверхности сплавов (параллельные и перпендикулярные усилию прессования). Для количественной оценки преимущественной ориентации зерен использовали вес текстуры P_{hkl} для плоскостей hkl , определяемый по значениям интенсивностей рефлексов J_{hkl} на рентгенограммах по формуле:

$$P_{hkl} = \frac{J_{hkl}(\sum J'_{hkl})}{(\sum J_{hkl})J'_{hkl}}$$

где штрихом обозначена интенсивность для нетекстурированного материала, а суммирование ведется по всем рефлексам рентгенограмм [5].

Для поверхности сплава, перпендикулярной усилию прессования, характерны значения $P_{006} = 6,90$; $P_{015} = 0,60$; $P_{0015} = 1,90$, а для параллельной — $P_{006} = 1,25$; $P_{015} = 1,6$; $P_{110} = 1,22$; $P_{0015} = 0,18$.

Рентгенофазовый анализ показал, что материал содержит одну фазу твердого раствора $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{—Sb}_2\text{Te}_3$. Его концентрационная неоднородность, соответствие элементного состава формуле и наличие посторонних микровключений контролировались методами РСМА (на установке Camebax-Micro-Beam). Было установлено, что исследуемый материал имеет элементный состав, отвечающий его формуле, не содержит включений примесей и является гомогенным твердым раствором в пределах точности анализа ~2 % и пространственном разрешении ~1,5–2 мкм.

Исследование распределения примесей в материале проводилось методами электронной оже-спектроскопии (прибор ЭСО-3, оснащенный ионной пушкой, НПО "Буревестник"). Оже-электроны возбуждались первичным электронным лучом диаметром ~3 мкм и энергией 3 кВ, и их спектры исследовались анализатором типа цилиндрического зеркала в диапазоне энергий 30–700 эВ. Спектры электронов регистрировались с использованием стандартной технологии синхронного детектирования на частоте 10 кГц и модуляцией 2–5 эВ. Установка образца в фокусе анализатора осуществлялась по пику упруго отраженных электронов. Перед установкой в камеру прибора поверхность образца промывалась спиртом, а затем очищалась скрайбированием. Рабочий вакуум в камере составлял $(2\text{--}3) \cdot 10^{-7}$ Па. Травление проводилось ионами Ag^+ с энергией 4 кэВ. После предварительной калибровки скорости распыления поверхности по глубине ее значение было равно 0,1 нм/с.

Как показали исследования, до травления поверхность образцов обоих типов сильно загрязнена преимущественно углеродом и кислородом (рис. 1, кривые *a, б*), при этом пики, соответствующие основным компонентам сплава Sb и Te, слабо проявляются над уровнем фоновых флуктуаций. Амплитуда линии углерода на поверхности, перпендикулярной усилию прессования (рис. 1, кривая *a*), меньше, чем на поверхности, параллельной направлению прессования (рис. 1, кривая *б*). Высота пиков кислорода в обоих случаях оказывается одинаковой. Ионное травление поверхностей приводит к перераспределению амплитуд линий Sb, Te и Bi и уменьшению пиков углерода (C) и кислорода (O). На рис. 2 (*a, б*) представлены характерные кривые изменения амплитуды пиков Sb, Te, Bi, C

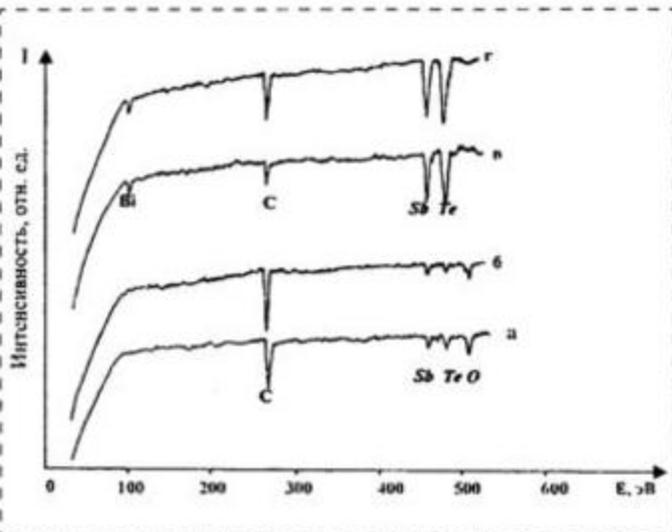


Рис. 1. Спектры оже-электронов с поверхности сплава $\text{Bi}_{0,24}\text{Sb}_{1,76}\text{Te}_3$:

кривые *a, б* — до травления; кривые *в, г* — после травления в течение 600 с; кривые *a, в* — поверхность перпендикулярна усилию прессования; кривые *б, г* — поверхность параллельна усилию прессования

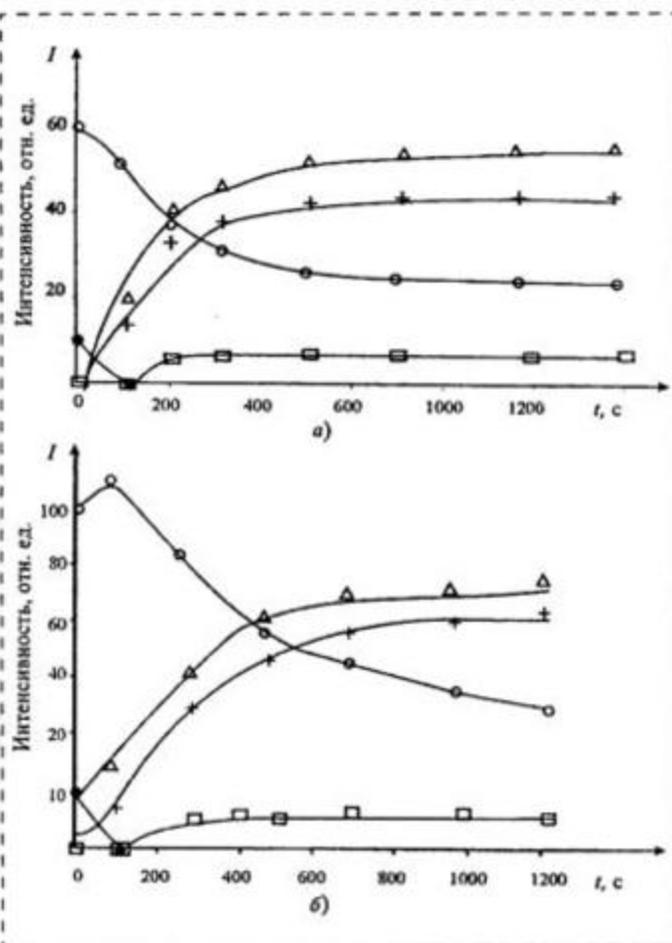


Рис. 2. Изменение интенсивности линий оже-спектров в зависимости от времени травления:

a — поверхность перпендикулярна усилию прессования; *б* — поверхность параллельна усилию прессования; + — Sb; Δ — Te; \square — Bi; \circ — C; \bullet — O

и О от времени травления, т. е. от поверхности в глубь материала, для двух видов ориентации исследуемых поверхностей. С целью усреднения результатов измерения съемка проводилась в режиме сканирования электронного зонда по площади 150×150 мкм. Видно, что на поверхности, параллельной усилию прессования, интенсивность линии углерода приблизительно в 2 раза больше, чем на поверхности, перпендикулярной усилию прессования. При этом, если в первом случае содержание углерода С монотонно снижается, а содержание Те, Вi и Sb растет по всей исследованной глубине, равной ~ 100 нм (рис. 2, б), то во втором случае содержание С, Sb, Те стабилизируется, начиная с глубины ~ 50 нм. Кислород в обоих типах образцов обнаруживается только в относительно тонком слое ~ 10 нм и далее в глубину его присутствие не наблюдается, поэтому возможность влияния оксидных пленок на поверхности зерен на адгезионные и электрофизические свойства сплавов (Вi, Sb) $_2$ Te $_3$ маловероятна.

Таким образом, существование преимущественной ориентации кристаллитов в сплаве влияет на глубину и степень насыщения углеродом поверхности. Форма линий Sb и Те спектра оже-электронов анализируемого сплава существенно отличается от их вида у чистых элементов, когда время травления не превышает 499–700 с. Так, в диапазонах энергий 450–465 эВ и 480–490 эВ у чистых Sb и Те наблюдается по два пика $M_{4,5}N_{4,5}N_{4,5}$, тогда как в анализируемых образцах они сливаются в одну широкую линию для каждого элемента (см. рис. 1, кривые в, г). При увеличении времени травления линии Sb и Те принимают форму, характерную для чистых элементов. Это, возможно, вызвано образованием на поверхности сплавов карбидных и окисных соединений в дальнейшем насыщении свободным углеродом более глубоких слоев материала в результате диффузии по структурным дефектам и границам зерен. В пользу этого предположения косвенно указывают большее содержание углерода вблизи поверхности, параллельной усилию прессования, чем на поверхности, перпендикулярной приложенному усилию, что, вероятно, обусловлено большей скоростью диффузии углерода вдоль плоскостей спайности керамики, а также результаты рентгеновского микроанализа, не обнаруживающего включений карбидных фаз в сплавах.

Для выяснения факторов, влияющих на форму линий Sb и Те в поликристаллических образцах, было исследовано распределение компонентов и формы линий Sb и Те по глубине от поверхности в монокристалле $Bi_{0,24}Sb_{1,76}Te_3$, выращенном по методу Чохральского. Для исследования была выбрана грань, параллельная плоскостям (001), полученная сколом монокристалла на воздухе, как наиме-

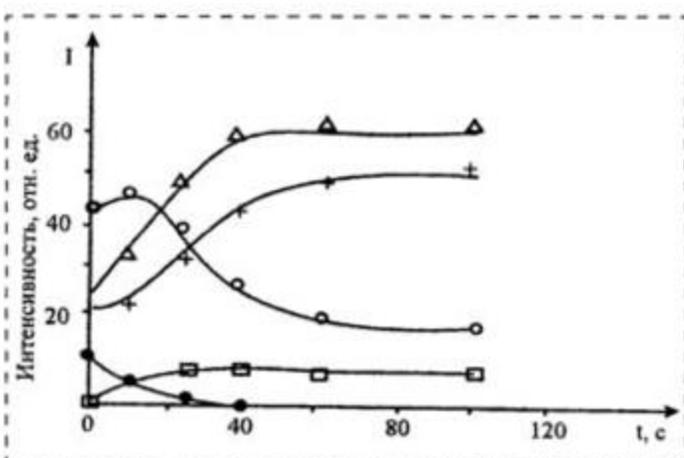


Рис. 3. Изменение интенсивности линий оже-спектров в зависимости от времени травления для монокристалла $Bi_{0,24}Sb_{1,76}Te_3$: + — Sb; Δ — Те; □ — Вi; ○ — С4; • — О

нее насыщенная примесями. Измерения показали, что углеродная пленка на поверхности монокристалла значительно тоньше 5 нм (рис. 3), и стабилизация содержания Те, Sb и Вi начинается после 40 с травления, при этом высота пика С лишь незначительно превышает флуктуации фона (рис. 4). Форма линий Те и Sb на нетравленной поверхности практически совпадает с формой линий на поликристаллических образцах в начале травления, однако уже после 80 с травления поверхности монокристалла происходит расщепление линий Sb и Те (рис. 4, кривая б), и их форма приближается к форме линий чистых элементов.

Таким образом, результат этого эксперимента показал, что в поликристаллическом материале $Bi_{0,24}Sb_{1,76}Te_3$ происходит науглероживание его поверхностного слоя, возможно, образованием

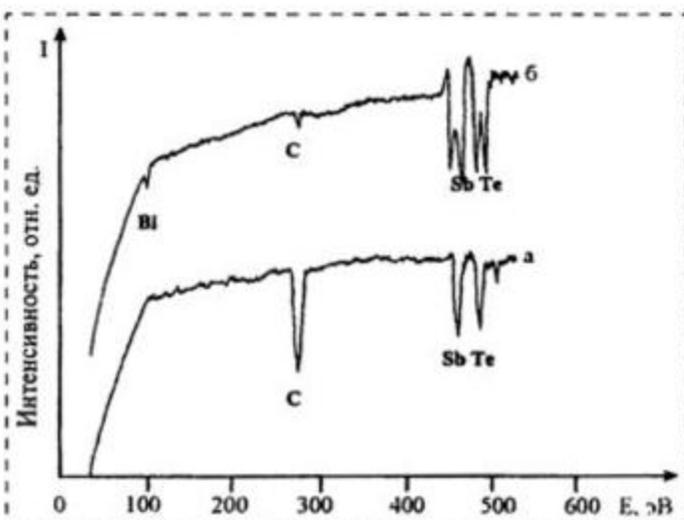


Рис. 4. Спектры оже-электронов с поверхности монокристалла $Bi_{0,24}Sb_{1,76}Te_3$: кривая а — до травления; кривая б — после травления в течение 80 с

карбидных фаз. Однако уточнение состава этих фаз и механизм формирования требуют дальнейших исследований.

Так как поликристаллический материал представляет собой конгломерат достаточно произвольно ориентированных кристаллитов, то различное насыщение углеродом поверхностей, параллельных и перпендикулярных усилию прессования, позволяет сделать предположение о неоднородном насыщении различных зерен сплава. Для проверки этого предположения проводили травление и последовательную запись оже-спектров в различных точках поверхности на разных образцах сфокусированным электронным зондом (диаметр ~3 мкм). Было обнаружено, что толщина области, насыщенной углеродом, может изменяться в 1,5—2 раза, что согласуется с усредненными результатами, полученными с помощью сканирующего зонда от обоих типов поверхностей материала. Кроме того, более детальное исследование различных образцов позволило установить, что вблизи поверхностей сплавов, соприкасавшихся с поверхностью прессформы, существует область шириной 30—50 мкм, в которой отсутствуют кислород и углерод. Последнее может быть обусловлено тем, что скорость диффузии углерода определяется не только ориентацией зерен, но и концентрацией структурных дефектов различных типов.

Наблюдаемые нами неоднородности распределения углерода хорошо согласуются с заключением, сделанным авторами [6] о нарушениях ростовой текстуры сплава при его резке, в результате чего на поверхность выходят зерна с различными ориентировками, что влияет на адгезию никеля. Очевидно, неоднородное науглероживание кристаллитов также может влиять на значение адгезии материала припоя, что позволяет объяснить влияние технологии обработки поверхности на скорость диффузии и переменное значение адгезии в различных участках поверхности. Так, очистка поверхности удаляет примеси карбидов неравномерно по поверхности зерен, что и может приводить к плохой адгезии припоя на некоторых участках сплава и влиять на скорость диффузии компонен-

тов припоя. Однако степень влияния каждого из этих факторов требует дальнейших исследований.

Выводы

1. Показано, что поверхности $\text{Bi}_{0,24}\text{Sb}_{1,76}\text{Te}_3$ загрязнены примесями углерода и кислорода, при этом глубина насыщения сплава углеродом приблизительно в 5—10 раз превышает глубину залегания кислорода.

2. Углерод интенсивно насыщает поверхности, параллельные усилию прессования. В случае, если поверхность перпендикулярна усилию прессования, насыщение происходит значительно слабее.

3. Анализ $\text{M}_{4,5}\text{N}_{4,5}\text{N}_{4,5}$ оже-линий сурьмы и теллура в поликристаллическом материале и монокристалле позволяет сделать предположение о возникновении карбидных фаз этих элементов сплава на поверхности кристаллитов, что может существенно влиять на выход годных изделий при серийном производстве термоэлементов.

Авторы выражают благодарность канд. физ.-мат. наук Шевцовой С. И., выполнившей исследование образцов на Camebax-Micro.

Список литературы

1. Гольцман Б. М., Кудин В. А., Смирнов И. А. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 . М.: Наука, 1972.
2. Ландышев А. В., Малыхин Ю. А., Соколов А. А. Диффузия висмута в сплав $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ // Изв. АН СССР. Сер. Неорг. материалы. 1986. Т. 22. № 6. 915 с.
3. Ландышев А. В., Малыхин Ю. А., Соколов А. А. Диффузия висмута в сплав $\text{Bi}_{0,48}\text{Sb}_{1,52}\text{Te}_3$ // Изв. АН СССР. Сер. Неорг. материалы. 1990. Т. 26. № 10. 2072 с.
4. Гельдгет Д. М., Дамашевский З. М. Влияние отжига на воздухе на электрофизические свойства пленок твердых растворов *n*-типа в системе Bi_2Te_3 — Sb_2Te_3 // Изв. АН СССР. Сер. Неорг. материалы. 1983. Т. 19. № 8. 1307 с.
5. Хейкер Д. М., Зевин Л. С. Рентгеновская дифрактометрия / Под ред. Жданова Г. С. М.: Физматгиз, 1963.
6. Освенский В. Б., Каратаев В. В., Малькова Н. В. и др. Изучение механизмов нарушения адгезии антидиффузионного покрытия Ni—P на термоэлектрических материалах Bi—Sb—Te и Bi—Se—Te // Доклады VII Межгосударственного семинара "Термоэлектрики и их применение". 2000. Санкт-Петербург. 48 с.

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Транзистор на основе сетки из нанотрубок

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

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

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

Углеродные нанопипетки

Американские ученые политехнического университета Louisville Rensselaer (США) получили наноструктуры нового вида. Данные структуры имеют коническую форму, внутри находится полость постоянного диаметра, поверхность состоит из свернутых графитовых плоскостей. Структуры были получены при изучении кристаллизации углеродных фаз. Подложку с платиновыми проводами помещали в метан-водородную плазму в реакторе химического осаждения. При этом вокруг кристалла образовывались нанопипетки. Структуры растут в смеси газов метана и водорода (1—2 % метана). Размеры нанопипеток зависят от времени роста, но в любом случае кончик пипетки имеет наноразмеры и полость постоянного диаметра внутри. Учеными были выращены пипетки длиной в несколько сотен нанометров до нескольких микрометров с внешним диаметром 200—700 нм, внут-

ренним диаметром 1—20 нм. Оба конца пипетки открыты. Ученые надеются, что дальнейшие исследования помогут им глубже понять механизм образования и роста наноструктур. А исследователи и биологи всего мира уже задумались над использованием новых наноинструментов.

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

Motorola внедряет память на нанокристаллах

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

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

Наноструктурированный графит поглощает водород

Японские ученые корпорации Sony создали наноструктурированный графит, способный абсорбировать водород при комнатной температуре. Данные наноструктуры были получены путем нагревания искусственного графитового порошка с частицами размером 200 нм в течение 2 ч при давлении $3,0 \cdot 10^{-4}$ Па. При этом процессе удаляются примеси. Далее порошок механически измельчался при давлении $2,0 \cdot 10^{-4}$ Па в течение 50 ч. При испытаниях материал поглощал 0,20—0,25 % водорода. Для сравнения, обычный графитовый порошок поглощает 0,02 % водорода. Как утверждают ученые, поглощение объясняется диффузией водорода в поры, которые имеют диаметр менее 1 нм.

В связи с этим заметим, что российский ученый В. И. Петрик разработал метод холодной деструкции природного графита [1], заключающийся в том, что в межслоевое пространство графита внедряется химическое соединение, способное под внешним воздействием (химическим, механиче-

ским, фотохимическим и др.) к экзотермическому взрывообразному разложению. В результате происходит отрыв атомарного углеродного слоя (одного или нескольких), которые могут скручиваться, в частности, в одно- и многослойные трубки. Открытые концы образований, в том числе нанотрубок со свободными связями, весьма активны и процесс идет, как правило, по пути формирования сложноорганизованных пространственных каркасных форм углерода.

Такой наноструктурированный материал, легированный палладием, является уникальным сорбентом водорода [2]. В целях легирования наноструктурных соединений разработан способ, основанный на способности металлов платиновой группы образовывать летучие трифторфосфиновые комплексы. Принципиальной особенностью таких комплексов является термическая отдаленность распада конкретного металла платиновой группы.

Это позволяет, в частности, осуществлять покрытие нанотрубок как чистыми металлами, так и смесью металлов платиновой группы в заранее заданном процентном отношении.

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

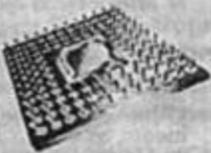
Список литературы

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

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

ИНФОРМАЦИЯ

28—31 мая в СК "Олимпийский" (г. Москва) состоялась выставка

Е • Х • Р • О 
ELECTRONICA
ЭКСПО-ЭЛЕКТРОНИКА
Е Ж Е Г О Д Н А Я
6-ая СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА
ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ

Организаторы — международная выставочная компания ПРИМЭКСПО (Санкт-Петербург), ITE Group PLC (Лондон) при поддержке Министерства промышленности, науки и технологий РФ, Министерства экономического развития и торговли РФ, Федерального фонда развития электронной техники РФ, АО "Российская Электроника", Управления электронной промышленности Российского агентства систем управления, внешнеторгового объединения "Электронинторг" и Ассоциации Российских дистрибьюторов.

Была представлена продукция более 350 компаний из 20 стран мира. Участниками выставки явились крупнейшие компании: 3 M, STMicroelectronics, Hitachi, Farnell, ПТС, Vishay, DECA Taiwan, Runtronik, Printprocess, Pacific Microelectronics, Royal Electronic Pty, Sang Jing Electronics Co, PICMG Europe, Good Sky Electric Co, Ho Tien Precision Industry Co, Shenzhen Hom Electroacoustic Technology Co, Прософт, Аргус софт, Алкон, Элара, ПетроИнТрейд, Платан, Компэл и многие другие.

Посетители выставки могли ознакомиться с последними разработками отрасли, установить новые деловые контакты.

Журнал "Микросистемная техника" был отмечен дипломом за участие в выставке "ЭКСПО—ЭЛЕКТРОНИКА-2003".

CONTENTS

- Vekshin M. M., Hotnyanskaya E. B., Nikitin V. A., Yacovenko N. A.** *Integrated-Optic Polarization Refractometer* 3

A high-sensitive polarimetric-type micro-waveguide refractometer is proposed. It is based on four-layer optical waveguide structure with dielectric isotropic layers, having significant modal birefringence, as a transducer element working. Phase shift of orthogonally polarized guided waves has linear dependence on index of cladding medium. The sensitivity is of an order $1 \cdot 10^{-6}$.

- Korolev M. A., Chaplygin Iu. A., Tohonov R. D.** *The Integrated Microsystems — a New Generation By the Element Base* 6

The integrated microsystem is represented a smart power switch. At is show, that the use of CMOS technology is to be made the power switch microsystem.

- Nikolski K. N., Baturin A. S., Kupryashkin A. S., Tchesov R. G., Sheshin E. P.** *"Ring Effect" in High Current Field Emission* 8

The effect of ring appearance in the flat vacuum diode is described. During the tests of flat cathodes produced by electrophoresis, electrochemical deposition or by CVD methods we observed one, two and sometimes three rings appear in high current mode. The model of rings appearance is given. It is shown, that rings formed by electrons scattered from the anode. Ring size independent at applied voltage and cathode current. It is determined by anode-cathode distance for flat diode. Diameter of ring is 4 times greater than anode-cathode distance. Results of experimental confirmation of the proposed model are presented. The possibility of the "ring effect" application is discussed.

- Mikhailov P. G.** *Formegenerator Processes of the Creation of Micromechanical Devices* 10

Available techniques for patterning structures for microelectronic sensors are analyzed. Methodology for MEMS patterns analysis based on anisotropy of source material and etchant properties is proposed.

- Glushanin S. V., Topolov V. Yu.** *An Analysis of electromechanical Properties of 1—2 composites based on poled ferroelectric ceramic* 13

An algorithm for determination of effective elastic, piezoelectric and dielectric constants has been proposed within the framework of a new model of the 1—2 composite "poled ferroelectric ceramic — polymer". An effect of zigzag-like ferroelectric ceramic inclusions on non-monotonic and reversal-of-sign behaviour of different types of piezoelectric coefficients has been analysed. It has been shown that such behaviour has no analogs among the known two-component composites.

- Gaikovich K. P., Dryakhlushin V. F., Zhilin A. V.** *The Improvement of the Resolution of SNOM-Images Taking into Account the Probe Transfer Function* 19

Significant enhancement of resolution in the scanning near-field optical microscopy (SNOM) is achieved by deconvolution of measured 2-D distributions using Tikhonov's method taking into account the probe transfer function that was determined by smallest details of a processed image.

- Kaljaev I. A.** *Purposedistribution Algorithm in "Cloud" of Microrobots* 21

The problem of decomposition of the "cloud" of microrobots into groups (clusters) intended for decision of the goal problems set posed before the "cloud" is considered. Clusterization algorithm of the "cloud" based on the strategy of the collective taking up the decisions and differing the simple technical realization is suggested. The results of the experimental researches of the developed algorithm on the programmed model are reduced.

- Ageev O. A., Svetlichnyi A. M., Kocherov A. N.** *Optimization of Temperature and Thermoelastic Stress in SiC Wafer under Rapid Thermal Infrared Heating* 25

In this paper we have investigated the dependence of heater construction on distribution of exposure, temperature, radial and tangential stress elements, criterion of defect formation by the radius of 100 mm diameter SiC wafer under rapid infra red heating. Defined the optimal heating conditions, which not lead to linear defects formation.

- Adamatzky A., De Lacy Costello B., Melhuish K., Ratcliffe N., Wessnitzer Ya., Rambidi N. G.** *Controlling Autonomous Mobile Robots based on Chemical Belousov—Zhabotinsky Type Media* . . . 29

Basic principles and some results of investigations on experimental chemical controllers for autonomous mobile robots are discussed. General features of spatio-temporal dynamics of chemical reaction-diffusion media were used when designing model devices, namely spreading wave excitations, and specific wave interactions. Offered prototypes of chemical controllers uses information processing by reaction-diffusion media, simplicity of information input and output, and robustness of computational process resulting from large-scale parallelism of medium architecture, that is because of a multitude of computing primitives (micro-volumes) of the medium functioning in a parallel model. Examples of chemical controllers for robot navigation, finding the shortest paths in a complicated neighborhood, and image processing are under consideration.

- Usanov D. A., Skripal A. V.** *Characteristic Vibration Determination of Microobjects by Laser Radiation* 34

The measurement results of characteristic vibrating microobjects by methods of holographic and speckle interferometry and homodyne and autodyne interferometry are presented. The possibility of registration of nonhomogeneous objects, complicated periodical movements, as well as vibrations of detached biological organs are shown. The determination possibility of nano-meter vibrations by wideband autodyne system based on semiconductor laser are investigated.

- Landyshev A. V., Bitiutskaya L. V., Kosakov A. T.** *Research of Alloy Surface (Bi; Sb)₂Te₃ with Electron-Probe Methods* 42

Alloy surface based on Bi—Sb—Te was investigated with the Auger-electron spectroscopy and Electron-microscope analysis. It was found out, that industrial carbon concentration depends on the preferred orientation of alloy crystalline grains.

Carbon saturates such surface more intensively, which are parallel to a pressing effort.

Подписку за рубежом принимают:

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

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

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