

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 12 (125) ✧ 2010

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

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

Издается с 1999 г.

Главный редактор
Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора
Лучинин В. В.

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

Абрамов И. И.
Андривский Р. А.
Антонов Б. И.
Арсентьева И. П.
Астахов М. В.
Быков В. А.
Горнев Е. С.
Градецкий В. Г.
Гурович Б. А.
Кальнов В. А.
Карякин А. А.
Колобов Ю. Р.
Кузин А. Ю.
Мокров Е. А.
Норенков И. П.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросьянц К. О.
Петрунин В. Ф.
Путилов А. В.
Пятышев Е. Н.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.
Тимошенко С. П.
Тодуа П. А.
Шубарев В. А.

Отв. секретарь

Лысенко А. В.

Редакция:

Григорин-Рябова Е. В.
Чугунова А. В.

Учредитель:
Издательство
"Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Раткин Л. С. К вопросу об интеграции академической и вузовской науки в нанотехнологической сфере. 2

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

Матюшкин И. В. Методика компарации способов коррекции оптических эффектов близости при формировании топологии на фоторезисте 5
Соловьев В. В. Модель прецизионной обработки твердых хрупких кристаллических материалов с получением нанометрового рельефа поверхности. 10

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Еганова Е. М., Воронков Э. Н. Электрические свойства халькогенидных пленок, содержащих наночастицы золота 15
Рембеза С. И., Кошелева Н. Н., Рембеза Е. С., Буслов В. А. Газовая чувствительность пленок-композитов на основе SnO₂, поверхностно-легированных платиной. 17

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Козлов Д. В., Смирнов И. П., Корпухин А. С., Жуков А. А., Бабаевский П. Г., Сухоруков А. Г. Оценка влияния многоциклового изгиба на термомеханические характеристики упруго-шарнирных балок тепловых микроактюаторов 22
Распопов В. Я., Матвеев В. В., Лихошерст В. В., Алалуев Р. В., Иванов Ю. В., Шведов А. П., Серегин С. И. Информационно-измерительные системы ориентации на микромеханических чувствительных элементах для вращающихся по крену летательных аппаратов 26
Вопилкин Е. А., Чеченин Ю. И., Савицкая Л. Н., Бронникова Н. Г., Шашкин В. И. Переменный МЭМС-конденсатор с электростатическим управлением. 30
Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Корнеев И. В., Родионов В. А. Двухполюсный позиционно-чувствительный фотодатчик с отрицательной дифференциальной проводимостью 35

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ. АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Овакимян К. Г., Андриянов С. В. Аэростатные солнечные электростанции. 39
Ершова Е. В., Овакимян К. Г., Григорьев Д. В. Твердотельные солнечные батареи 41
Ершова Е. В., Овакимян К. Г., Свергун О. А. Гибкие солнечные батареи 45
Григорьев Д. В. Экономика солнечной энергетики 49

Указатель статей, опубликованных в журнале "Нано- и микросистемная техника в 2010 г." 51

Contents 55

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

ПОДПИСКА:

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

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

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

УДК 623.3

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

К ВОПРОСУ ОБ ИНТЕГРАЦИИ АКАДЕМИЧЕСКОЙ И ВУЗОВСКОЙ НАУКИ В НАНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СФЕРЕ

В 2010 году под патронажем Российской академии наук (РАН) и Министерства образования и науки РФ был организован ряд международных форумов, симпозиумов, конференций и научно-практических семинаров по проблематике интеграции академической и вузовской науки в нанотехнологической сфере. Одним из наиболее важных вопросов, обсуждавшихся на мероприятиях, являлся правовой аспект интеграции, в частности, связанный с защитой авторских прав на интеллектуальную собственность, полученную в результате совместных исследований, проводимых в институтах Российской академии наук и университетах РФ.

Ключевые слова: РАН, нанотехнологии, интеграция, университет

Одним из примеров наноиндустриальной разработки, созданной в академическом институте в сотрудничестве с рядом российских вузов [1], являются монодисперсные квантовые точки (МКТ) на основе халькогенидов кадмия структуры "ядро—оболочка" и в форме нанотетрапедов, полученные методом высокотемпературного коллоидного синтеза в ИПХФ РАН, возглавляемом вице-президентом РАН, академиком Алдошиным С. М. В широком спектральном диапазоне длин волн наблюдается эффект перестроения узких линий люминесценции, так как размер МКТ варьируется в пределах 3...10 нм.

В ИППИ им. А. А. Харкевича РАН совместно с ОАО "Ситроникс" для управления интеллектуальной собственностью, коммерциализации разработок и финансовой поддержки исследований учреждена автономная некоммерческая организация "НИИ Ситроникс". В НИИСИ РАН, возглавляемом членом Президиума РАН и членом Бюро Отделения нанотехнологий и информационных технологий (ОНИТ) РАН академиком Бетелиным В. Б., в рамках сотрудничества с кафедрами электроники и микроэлектро-

ники НИЯУ МИФИ создан учебно-научный комплекс.

Для терабитных волоконно-оптических линий в ИПЛИТ РАН созданы интегральные оптические устройства на основе новых полимерных материалов с применением субмикронных лазерных технологий. Разработаны матричные элементы для тканевой инженерии и имплантации с управляемой биоактивностью и заданной архитектоникой. Развитием наноиндустриальной инфраструктуры в регионах РФ явилось создание ИПЛИТ РАН в российских вузах девяти интегрированных научно-образовательных структур [2].

В ИФАВ РАН разработан новый тип фталоцианиновых комплексов редкоземельных металлов (РЗМ) с гекса-трет-бутил (ГТБ) замещенным планарным биядерным фталоцианином (БФ), макроциклы которого соединены общим нафталиновым или бензолным кольцом. Исследованы особенности синтеза сэндвичевых комплексов на основе ГТБ- и додека-н-бутилзамещенных БФ и ацетата РЗМ, при этом выявлена способность синтезированных комплексов к созданию наноразмерных частиц.

В ИОНХ им. Н. С. Курнакова РАН исследован метод синтеза группы гетерометаллических соединений на основе палладия (II) и платины (II, IV), в которых атомы благородных металлов соединены с атомами переходных, постпереходных металлов или РЗМ только мостиковыми карбоксилатными группами и не содержат прочно связанных донорных лигандов. Разработанные кластеры применимы для производства каталитически активных гетерометаллических нанокластеров и наносплавов. На базе гетерометаллического сплава Pd—Zn с диаметром частиц 5...10 нм получен новый катализатор гидроочистки этилена от примесей ацетиленов, по селективности в 2 раза превышающий стандартный промышленный катализатор Pd/Al₂O₃.

В ИХКГ СО РАН выявлен эффект псевдовращения в терагерцовой области частот, наблюдаемый для фотовозбужденного триплетного фуллерена C₆₀ в неупорядоченных средах. Ускорение поперечной спиновой релаксации вблизи температуры стеклования обусловлено изменением характера колебательных движений в стеклообразной матрице. Наблюдаемый в нанометровом диапазоне расстояний динамический переход в нано- и пикосекундном диапазоне времен от гармонического движения к негармоническому может быть применен при исследовании свойств и динамики изменения характеристик наноконструкций.

В ИМЕТ УрО РАН выполнены работы по системным термодинамическим исследованиям в широком температурном интервале бинарной системы Al—Sc, используемой для повышения свойств особопрочных алюминиевых сплавов. Синтез лигатур Al—Sc в виде быстрозакаленных лент из расплава обеспечивает увеличение в них содержания Sc до 2 мас. %, что существенно выше его равновесной растворимости в Al, при этом сплавы не имеют превышающих наноразмерный диапазон включений интерметаллидов.

В ИМЕТ УрО РАН в сотрудничестве с рядом вузов Уральского федерального округа в наноразмерных ян-теллеровских (ЯТ) системах исследованы фазовые структурные превращения, в частности, установлен факт существенного изменения параметров структурных фазовых переходов при переводе в нанокристаллическое состояние кристалла, содержащего ЯТ-ионы. Наряду с выявлением зависимостей температуры, скачка энтропии и скрытой теплоты фазового превращения от размера зерна спрогнозирована возможность неаоднофазного состояния нанокристаллической системы с присутствием в ней высокосимметричной и низкосимметричной ЯТ-фаз одновременно, что было подтверждено в ходе экспериментов для системы Mn—O.

В ИНЭОС им. А. Н. Несмеянова РАН в рамках сотрудничества с Московским медико-стоматологическим университетом (ММСУ) на основе сверхвысокомолекулярного нанопористого полиэтилена синтезированы биосовместимые наноконпозиты с близкими к свойствам природного сустава уникальными антифрикционными показателями. Изделия используются в детской челюстно-лицевой хирургии в ММСУ и перспективны для применения в полимерных нанотехнологиях при создании антифрикционных биомедицинских материалов. Также в ИНЭОС РАН создана методика получения наночастиц палладия, платины и оксидов железа внутри гранул сверхсшитого нанопористого полистирола для создания высокоактивных катализаторов реакций ароматических соединений, композитов для очистки воды от токсичных веществ и эффективных магнитных сорбентов. Особенностью разработанной методики является выделение посредством магнитной сепарации из суспензий магнитных сорбентов после сорбции целевых компонент, с многократным использованием катализатора.

В МГУ им. М. В. Ломоносова, возглавляемом вице-президентом РАН академиком Садовничим В. А., исследованы процессы самоорганизации в комплексных многокомпонентных системах, включающих организованные в мицеллы, полимерные звезды и щетки амфифильные блок-сополимеры, склонные к образованию более сложных структур методом взаимодействия с химически комплиментарными линейными макромолекулами. Явления самоупорядочения звездообразной топологии приводят к образованию структур типа "ядро—оболочка" или "ядро—оболочка—корона", в которых оболочка или ядро созданы из интерполимерного комплекса, что можно применять для дизайна уникальных функциональных многоуровневых наносистем, в частности, ис-

пользуемых для создания новых нанодисперсных каталитических систем и для адресной доставки лекарственных соединений и их контролируемого высвобождения [3].

Сходные по числу атомов и структуре с некоторыми протеинами структуры семейства минералов типа паулингита сконструированы в ИХС им. И. В. Гребенщикова РАН, возглавляемом академиком В. Я. Шевченко. Выявлен новый цеолит с параметрами кубической ячейки 2,5 нм, названный ISC-1 (ИХС-1). Разработана методика построения универсального оптимума, содержащего необходимую информацию на материальном носителе (ген, конфигурации) для построения структур вещества начиная с элементарной наночастицы. Построение выполняется в алгоритме клеточного автомата фон Неймана. Также в ИХС РАН для проектирования электромеханических преобразователей энергии специального назначения (ЭМПЭСН) исследованы новые наноматериалы: немагнитная сталь повышенной прочности с пределами текучести не менее 1600 МПа; структурированная наночастицами титана, серебра и кобальта сталь для изготовления бандажного стакана ротора и аморфное металлическое антифрикционное покрытие ротора на основе железа — АМАГ-200 (FeSiB₂NbCu). Разработанные требования к новым наноматериалам позволяют значительно повысить технические характеристики ЭМПЭСН.

В Воронежском государственном университете (ВГУ) с помощью ВЧ магнетронного напыления на титане созданы однофазные покрытия из нанокристаллического гидроксипатита с твердостью покрытия свыше 10 ГПа. Изучены эффекты пространственной неоднородности плазмы ВЧ разряда магнетрона, наблюдаемые при формировании структуры покрытия. Исследованы разные способы улучшения структуры поверхности титана для увеличения адгезии. В настоящее время в ВГУ достигнуто значение адгезии в 12 Н.

В ИХТТМ СО РАН на средних и малых углах с применением синхротронного излучения методами "дифракционного кино" исследован процесс термического разложения длинноцепочечных карбоксилатов серебра, в ходе которого установлен факт образования упорядоченных в периодические мезоструктуры монодисперсных наночастиц серебра размером 5—6 нм. В отличие от аналогов, предлагаемый метод исключает дополнительные операции, в том числе по приготовлению коллоидных растворов с применением поверхностно активных веществ, что обеспечивает его использование в качестве стандарта при изучении свойств материалов.

В ИНХ им. А. В. Николаева СО РАН разработаны методы синтеза массивов углеродных нанотрубок с ориентацией, перпендикулярной поверхности проводящей подложки. Опытным путем выявлены наиболее эффективные режимы для электрохимического осаждения на поверхность нанотруб полианилина. Композиционный материал с удельной емкостью (УЕ) порядка 550 Ф/г и уменьшением УЕ на не более чем 2 % после 1400 циклов "заряд—разряд" может применяться в суперконденсаторах.

В ФГУП ЦНИИ конструкционных материалов "Прометей" (научный руководитель — академик РАН И. В. Горынин) на наноиндустриальной базе разработаны новые композиции с улучшенными в 2—3 раза значениями технических характеристик по электроизоляции и вибропоглощению, на основе которых производят ограничители напряжений для подстанций городского электротранспорта и узлы трения опорных амортизирующих реле, судовых гермопроводов и гидротурбин для главных силовых агрегатов кораблей.

В Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН изучено влияние структурного состояния (от моно- до нанокристаллического) на магнитные свойства синтезированных с использованием высокочистых редкоземельных металлов соединений $R_2Fe_{14}B$ ($R = Y, Tb, Dy, Ho$). Новые данные о магнитных параметрах, остаточной намагниченности образцов, намагниченности насыщения, температуре Кюри и коэрцитивной силе в моно-, поли- и нанокристаллическом состояниях позволили определить 10-кратный рост в нанокристаллических образцах коэрцитивной силы по сравнению с монокристаллами благодаря межкристаллитному обменному взаимодействию.

В ИХФ им. Н. Н. Семенова РАН выявлено гиперактивирующее воздействие внешних магнитных полей в 100...700 Э на $^{25}Mg^{2+}$ -спин-селективный катализ, обеспечиваемый рядом ферментов семейства киназ (фосфенолпируваткиназа, α -глицерофосфаткиназа, креатинкиназа). Изучен магнитный изотопный эффект, отсутствующий при активации ферментов ионами $^{24}Mg^{2+}$ и $^{26}Mg^{2+}$, и создан метод адресной доставки $^{25}Mg^{2+}$ в клетки миокарда крыс, страдающих от медикаментозной гипоксии, с помощью катионных порфириин-фуллереновых наночастиц PMS16.

В ИТЭБ РАН проведены исследования, подтверждающие факт 30 %-ного ингибирования пролиферации клеток Нер 2 при одновременной гипертермии в случае применения нанокристаллов кремния в концентрациях, в 3 раза меньших границы их оптимальной эффективности. Проведено математическое моделирование регуляции скорости пролиферации клеток животных в культуре при совместном действии разных стимулирующих и ингибирующих агентов.

В ИТЭБ РАН в сотрудничестве с научными коллективами ИБХ им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН, ИМБ им. В. А. Энгельгардта РАН и Казанским институтом биохимии и биофизики Казанского научного центра сформулированы новые методики расчета белковых и липидных молекул, используемые в экспериментальных исследованиях и компьютерном дизайне биологически активных макромолекулярных конструкций с применением биомacroмолекул и наночастиц не биологической природы. Данные методы применимы для анализа структуры и динамики макромолекул при ядерно-магнитном резонансе.

Наконец, классический пример успешного сочетания академических и вузовских нанотехнологических разработок — Санкт-Петербургский академический университет, возглавляемый лауреатом Но-

белевской премии, академиком Ж. И. Алферовым. Являясь членом Комитета по науке и наукоемким технологиям ГД ФС РФ, академик Ж. И. Алферов в выступлениях неоднократно подчеркивает необходимость синтеза академических и вузовских разработок и интеграции РАН и университетов для инновационного развития российской экономики [1].

Выводы

1. По оценкам экспертов, финансирование НИОКР в России составляет менее 1 % от ВВП, в то время как в развитых странах этот показатель превышает 2 %: например, в Японии, Швеции, Израиле он составляет порядка 5 %. Расходы в РФ на инновационные технологические разработки оцениваются экспертами в 1,2 % ВВП, что на порядок меньше затрат в ведущих индустриальных странах. Для интеграции академической и вузовской науки необходимо привлечение частных капиталовложений и средств госбюджета. Финансирование может использоваться для приглашения на работу по контракту ведущих зарубежных ученых — руководителей научных школ; на перевооружение отраслей; модернизацию технологической базы; обучение специалистов и закупку оборудования.

2. В российских научных корпорациях наука развивается недостаточно активно и наблюдается неэффективное использование отраслевых фундаментальных разработок. Необходимо предоставление налоговых льгот малым инновационным фирмам при вузах для инвестирования инноваций и реконструкции отношений бизнеса и науки, в которых заказ на научные разработки исходил бы от коммерческих организаций. Создание в РФ инноградов должно базироваться на имеющемся интеллектуальном потенциале, в частности, целесообразно создание российских научно-технологических комплексов и наукоградов с использованием потенциала Академгородков. Участие в инвестиционных и инновационных проектах малых и средних предприятий будет способствовать формированию цивилизованного рынка интеллектуальной собственности и внедрению в промышленное производство высоких технологий.

3. Федеральный закон № 217 позволяет создавать бюджетным учреждениям предприятия класса Start Up. Вместе с тем в настоящее время в промышленно развитых странах применяются более совершенные схемы инновационного развития. Например, в США, помимо Start Up, реализуется система из четырех звеньев, в которой бизнес-структуры налаживают серийный выпуск востребованной на рынках сбыта продукции, выпускаемой экспериментальными партиями на промышленных предприятиях. Это предполагает предварительный поиск рынков сбыта для разработанной наукоемкой продукции коммерческими организациями, что обуславливает необходимость высокотехнологичных разработок научными учреждениями — академическими институтами и вузами. Все участники данного инновационного процесса экономически заинтересованы в профессиональном выполнении своих обязательств каждой

из сторон. В отличие от предприятий класса Start Up, реализующих всю цепочку от фундаментальной науки через прикладную и опытное производство до серийного выпуска, данная схема способствует оперативному мониторингу результатов НИР и ОКР с охраной авторских прав на интеллектуальную собственность и развитием промышленного производства. Важно отметить, что необходимым условием успешной реализации инвестиционных проектов по выпуску инновационной продукции является отсутствие конфронтации и нездоровой конкуренции между фундаментальной и прикладной, академической и вузовской наукой!

Список литературы

1. Алферов Ж. И. К вопросу о возрождении промышленности высоких технологий и диверсификации экономики на основе научно-технических разработок // Нефтегазопромышленный инжиниринг. 2010. № 1. С. 2.
2. Дианов Е. М. Первый китайско-российский симпозиум по новым материалам и технологиям // Вестник Российской академии наук. 2010. Т. 80. № 5–6. С. 546–550.
3. Булгакова Н. Шанс на ренессанс. Общими усилиями российскую высшую школу удастся обновить, уверен Президент РСР В. А. Садовничий. // ПОИСК. Еженедельная газета научного сообщества. // 16 июля 2010 г., № 28–29 (1102–1103). С. 5, 18.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНСТ

УДК 621.382; 51-74

И. В. Матюшкин, канд. физ.-мат. наук, нач. лаб.,
ОАО "НИИМЭ и завод Микрон"
E-mail: imatyushkin@sitronics.com

МЕТОДИКА КОМПАРАЦИИ СПОСОБОВ КОРРЕКЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ БЛИЗОСТИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТОПОЛОГИИ НА ФОТОРЕЗИСТЕ

На основе САПР Synopsys и MATLAB разработана методика компарации ОРС-методов. Дана математическая формулировка процедуры компарации, связанная с контурными метриками и учитывающая интерактивно-графический характер компаратора. Предложен метод базовой матрицы проведения компарации.

Ключевые слова: топология, коррекция оптических эффектов близости, машинное зрение, САПР, метрика

Введение

Уже к 1998 г. субмикронная технология достигла такого уровня развития, что длина волны экспонирующего излучения сравнялась с нормой проектирования. Доминирующей причиной оптических эффектов, возникающих в таких условиях, является дифракция лучей, проходящих через фотомаску со сложным топологическим рисунком. Чтобы избежать ресурсоемкого технического перевооружения производства при будущем переходе к нанотехнологиям, необходимо (в качестве одного из условий) практическое применение методов коррекции оптических эффектов близости (*Optical Proximity Correction*, ОРС). В настоящее время разработан ряд

способов ОРС [1], подавляющее большинство которых основано на внесении преднамеренных искажений в исходный топологический рисунок, компенсирующих его оптические aberrации в ходе фотолитографии.

В любом маршруте изготовления фотошаблонов должна быть предусмотрена процедура проверки качества ОРС, без которой невозможно сказать об успешности тех или иных конкретных способов ее проведения. Вообще говоря, такая процедура предполагает первостепенной задачей определения степени целесообразности проведения ОРС. Для решения этой задачи необходимо количественно сравнить два топологических рисунка: желаемый проектировщиком и действительный, получающийся с учетом особенностей фотолитографии. Второй задачей, которая с формальной точки зрения ничем не отличается от первой, является сравнение желаемой топологии и действительной, получающейся из прошедшей ОРС исходной топологии. Обобщая первую и вторую задачи, закономерно поставить и третью задачу — на основании сравнения (компарации) разных ОРС-топологий выявить эффективность ряда методов ОРС на некоторых подмножествах исходных топологий.

Целью данной статьи является описание методики проведения такой компарации в контексте современных САПР и известных математических методов. Компарация методов ОРС рассматривается только с точки зрения ее результатов, а не трудоемкости (например, временной или алгоритмической).

Место процедуры компарации в маршруте подготовки топологической информации

На рис. 1 графически представлена возможная схема реализации процедуры компарации на физико-топологическом уровне проектирования интегральных схем. Несмотря на то что критерии сравнения (компарации) зависят от требований технического

задания и имеющихся правил проектирования, а также допускают математическую полиморфность, представляется целесообразным иметь:

- коллекцию математических формулировок компарационных критериев;
- их программную реализацию средствами САПР, что позволит автоматизировать процедуру компарации.

Здесь и далее программу, реализующую компарацию, будем называть *компаратом*. Подчеркнем, что компарация не может быть полностью автоматизирована, поскольку конкретное определение критических фрагментов исходной топологии связано с трудом формализуемыми особенностями самой микросхемы. Следовательно, компаратор должен быть интерактивно-графической средой, удовлетворяющей ряду требований:

- топологический рисунок и соответствие между двумя рисунками должны распознаваться без потерь;
- использованные алгоритмы должны быть применимы к топологическим рисункам произвольной сложности;
- интерфейс должен предусматривать модификацию критериев компарации проектировщиком;
- должен поддерживаться сбор статистической информации по исследованным методам OPC и типам микросхем;
- усовершенствование компаратора должно идти в сторону его интеллектуализации и минимизации вмешательства человека в процедуру компарации;
- компаратор должен быть легко интегрируем в существующие специализированные для OPC САПР.

Подробнее остановимся на деталях процедуры компарации. Непосредственно компарация происходит на переходах между блоками 07, 08, 09. Входными данными для компарации являются экспортированные вначале в текстовый формат, а потом в математические структуры типа матриц/ячеек общематематического САПР три модификации фрагмента топологического рисунка, который показался проектировщику по тем или иным причинам интересным. Первая модификация — это желаемая топология T_1 , являющаяся целью проектирования, вторая (T_2) — это образ T_1 , учитывающий технологические особенности фотолитографического процесса, третья (T_3) — это образ OPC-модифицированной топологии T_1 , полученный путем моделирования.

Особенностью предлагаемой методики служит вынесение топологической информации в САПР, пред-

назначенное для математической обработки данных. Оставаясь в пределах стандартного топологического САПР, мы все равно пришли бы к рассмотрению топологии в текстово-матричном формате, что необходимо с математической точки зрения. Мы рекомендуем использовать широко известный пакет MATLAB, оснащенный мощными средствами математического моделирования. Сравнительная легкость написания скриптов оправдывает уход от общепринятых топологических редакторов и переносит центр тяжести компарации на MATLAB. Оказывается полезным в блоке 07 (рис. 1) использование компоненты MATLAB Mapping Toolbox, первоначально предназначенной для нужд геодезии и содержащей высокоуровневые средства обработки контурных линий. То же самое можно сказать о скрипте визуализации (блок 08), который задействует утилиту ядра MATLAB Figure Editor.

Блок 04 можно реализовать по-разному, в зависимости от доступного топологического САПР; выбранный формат CIF (*Caltech Intermediate Format*) достаточно универсален и является текстовым в отличие от GDSII. Полиформность формата CIF снижает степень автономности процедуры компарации от других блоков маршрута OPC-коррекции фотосаблонов, что является узким местом методики. Часть этого маршрута представлена в укрупненном виде блоками 01—06 на рис. 1.

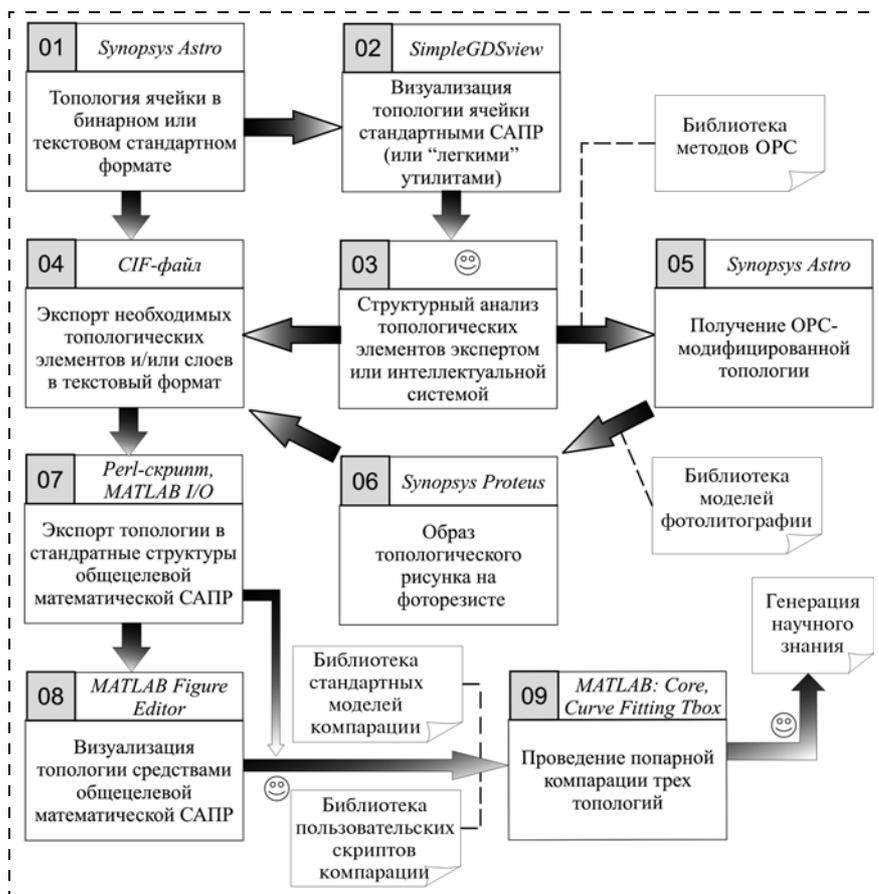


Рис. 1. Место процедуры компарации в маршруте реализации OPC. Смайликами указаны места, требующие вмешательства человека. Штриховыми линиями показаны места, требующие привлечения научно-технической информации. Внесенные в заголовок блоков названия САПР или форматов файлов носят рекомендательный характер

Специфика задач компарации

В сильно облегченном виде мы вновь сталкиваемся с проблематикой "компьютерного зрения" и анализа эффективности видеокодеков, проводящих сжатие информации с учетом подобия близких по времени кадров. Такой подход к сжатию информации породил понятия "ключевой кадр" и "кодирование разности кадров" [2, 3]; кроме того, в последнее время появились работы по контурным метрикам видеoinформации [4, 5]. Хотелось бы отметить научные исследования в Самарском государственном аэрокосмическом университете — институте систем обработки изображений РАН. Ряд контурных метрик предложен в [6]. Вместе с тем учет специфики представления графической информации в случае топологии СБИС позволит упростить многие имеющиеся алгоритмы и подходы, что составляет научную новизну процедуры компарации. Эту специфику можно выделить так:

- топологии T_1, T_2, T_3 имеют общую систему координат и целочисленную сетку, априори задаваемую исходным топологическим редактором;
- топология представлена слоями, причем содержание одного слоя может влиять/порождать критерий компарации;
- топологические элементы дискретизируются полигонами, реализованными в виде целочисленных пар (x, y) по направлению обхода контура (несущественным усложнением является наличие примитивов-прямоугольников, заданных координатами двух вершин);
- топологии T_2, T_3 также формализуются полигонами большей размерности, чем T_1 , что является следствием их генерации программой моделирования фотолитографии (эта размерность, в свою очередь, зависит от шага и точности моделирования и интерполяции данных в соответствующей САПР, например Synopsys Proteus);
- файлы топологии часто содержат описание избыточных поперечных линий, что приводит к необходимости предобработки топологической информации.

Особенности задач компарации, кратко отображенные на рис. 2–5, еще раз подчеркивают необходимость интерактивности для компаратора.

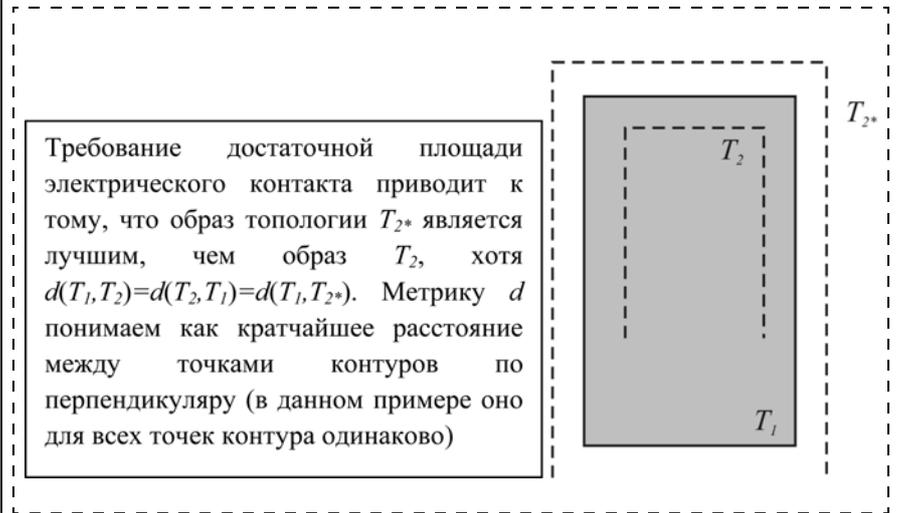


Рис. 2. Пример, иллюстрирующий, что понятие метрики может быть использовано в процедуре компарации только косвенно

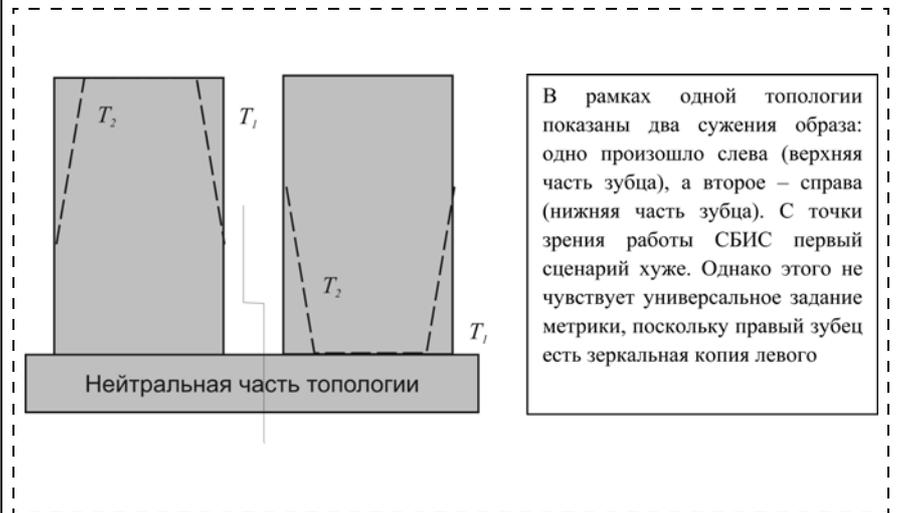


Рис. 3. Аспект анизотропии при компарации топологий

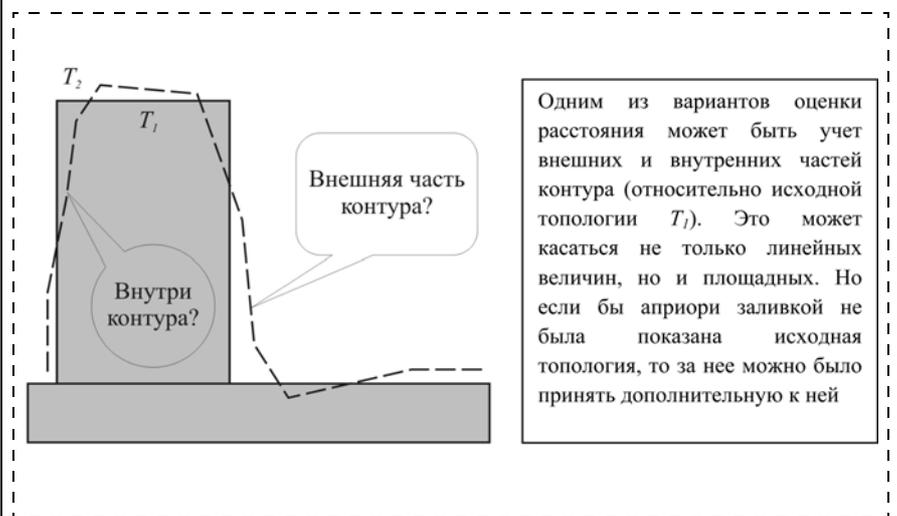


Рис. 4. Проблема идентификации внутренних и внешних точек

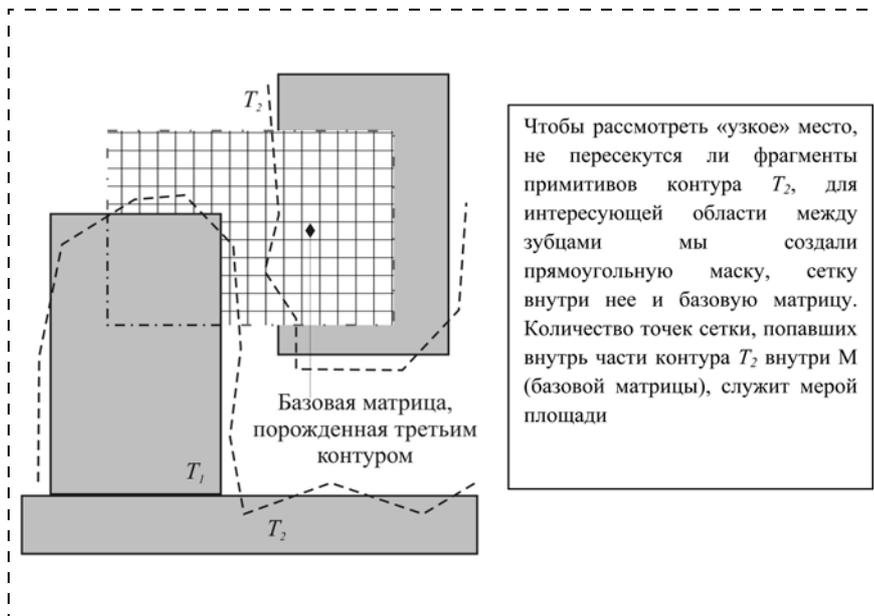


Рис. 5. Задача поиска наименьшего расстояния между линиями и локализации участка топологии



Рис. 6. Алгоритм применения метода базовой матрицы. Примечание: смайликом указан пользователь компаратора, штриховыми линиями — направления влияния, сплошными стрелками — потоки информации

На рис. 6 показан фрагмент алгоритма работы компаратора. Критерии компарации уместно разделить на группы: площадные, линейные, угловые и условные. Площадные критерии основаны на вычислении разности площадей контуров; в качестве линейного критерия можно привести наименьшее манхэттенское расстояние между двумя контурами. Угловым критерием рассматривает, под каким углом пересекаются их фрагменты, или находит дефекты "зазубрин" в OCR-контуре. Условные критерии связаны с наличием третьего контура, возможно, служащего маской, расположение которой влияет на расчет по критериям предыдущих групп.

Математический базис компарации

Перейдем теперь к математическим формулировкам задач процедуры коррекции. Пусть \mathfrak{K} — множество топологий (контуров), \mathfrak{S} — множество критериев компарации, \mathfrak{R}^+ — множество неотрицательных действительных чисел, D — множество метрик, заданных на множестве \mathfrak{K} , B — знак булеана, \times — знак декартового произведения. Структуры этих множеств рассмотрим позднее, сейчас остановимся на метриках.

Согласно классическому определению метрики, для выбранной метрики $d(T_i, T_j): \mathfrak{K}^2 \rightarrow \mathfrak{R}^+$ справедливы аксиомы рефлексивности, симметричности и полутранзитивности (неравенства треугольника).

Возникает естественное желание считать метрику $d \in D$, определяющую "расстояние" между контурами, одним из критериев компарации $c \in \mathfrak{S}$. И если свойство рефлексивности не вызывает сомнений, хотя и следует более точно определить понятие "равенство" в отношении топологий, то свойство симметричности может нарушаться, поскольку топология T_1 явно имеет привилегированное положение (см. рис. 2.). То же самое можно сказать о нестрогой транзитивности (см. рис. 3). В математике есть одна конструкция, как будто пригодная для наших целей, — это мера $\mu: \mathfrak{K} \rightarrow \mathfrak{R}^+$, но вводится скорее для множеств в предположении выполнения аддитивности. Поэтому нам придется вернуться к метрикам.

Назовем функцией компарации f_c такую функцию, которая ставит в со-

ответствие каждому критерию компарации $c \in \mathfrak{K}$ и некоторому кортежу из $\alpha \in \mathfrak{R}^+$ некоторую метрику $d \in D$, т. е. $F_c: \mathfrak{K} \times \mathfrak{R}^{+p} \rightarrow D$ (p — натуральное число). Смысл введенного кортежа заключается в том, что эксперты должны предоставить компаратору априорные оценки степени приемлемости для той или иной схемы близости или удаленности контуров. Ближайшая аналогия — понятие доверительной вероятности в математической статистике.

Контурной метрикой $L(T_i, T_j)$ для двух контуров назовем следующее число:

$$L = \sum_r \beta_r f_c[c_r, \alpha_r](T_i, T_j). \quad (1)$$

Индексом r мы отражаем тот факт, что сравнительные критерии могут применяться совместно, а весовое значение каждого задается неотрицательным коэффициентом β_r . Для r -го критерия c_r должны быть указаны параметры оценки α_r , которые могут браться либо по умолчанию, либо задаваться проектировщиком (особенно это касается пользовательских скриптов компарации, отраженных в переходе 08—09 на рис. 1).

Это позволяет нам математически сформулировать первую задачу компарации (L^* — наибольшее допустимое "расстояние" между топологиями):

$$L(T_1, T_2) \leq L^* \Leftrightarrow \text{ОРС} - \text{коррекция не требуется}. \quad (2)$$

Эффективностью ОРС-метода на заданной топологии T_1 будем называть величину

$$W = \frac{L(T_1, T_2) - L(T_1, T_3)}{L(T_1, T_2) + L(T_1, T_3)}. \quad (3)$$

Нетрудно видеть, что такое задание эффективности ведет нас к удобным относительным единицам, в частности, $W = 0$ при отсутствии ОРС-модификации при $T_2 = T_3$ и $W = 1$ (100 %), если образ на фоторезисте совпал с желаемым, т. е. $T_1 = T_3$ и, соответственно, $L(T_1, T_3) = 0$. Более того, если $W < 0$, то мы можем говорить о неправомерности применения метода ОРС к данной топологии.

В случае, соответствующем рис. 4, нужно априори задать внутреннюю точку множества. Для выпуклого многоугольника, определенного последовательностью вершин $\langle (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N) \rangle$ в роли такой точки может быть легко взята центральная $(\sum x_i/N, \sum y_i/N)$. В реальной топологии чаще реализуется как раз обратный случай. Если же известна внутренняя точка (x^*, y^*) , а топологический примитив представляет собой выпуклый многоугольник, возможно кусочно-криволинейный, т. е. помимо вершин заданный $(N-1)$ функциями $f_i(x, y) = 0$, $x \in [x_i, x_{i+1}]$, $y \in [y_i, y_{i+1}]$, $0 < i < N$, то любая другая внутренняя точка (x, y) определится из булева равенства

$$\bigcap_i [f_i(x^*, y^*) * f_i(x, y) > 0] \quad (4)$$

или для линейного случая

$$\text{sign} \left[\prod_{i=1}^{N-1} \frac{(y-y_i)(x_{i+1}-x_i) - (x-x_i)(y_{i+1}-y_i)}{(y^*-y_i)(x_{i+1}-x_i) - (x^*-x_i)(y_{i+1}-y_i)} \right]. \quad (5)$$

Детализируем метод базовой функции. Прежде формализуем базовую матрицу M , исходное множество контуров \mathfrak{K} , присутствующих в задаче, функцию $v(T)$, заданную на этом множестве и представляющую собой реберное описание контура. Все эти определения отражают основные концепты общей задачи компарации:

$$M \equiv \|(x, y)\|_{m \times n}; \quad \mathfrak{K} = \{(x, y)\}; \quad v(T)_{T \in T} = \quad (6)$$

$$= \left\langle (x, y) | (\exists i)((y-y_i)(x_{i+1}-x_i) = (x-x_i)(y_{i+1}-y_i)) \wedge ((x-x_i)(x-x_{i+1}) \leq 0) \wedge ((y-y_i)(y-y_{i+1}) \leq 0) \right\rangle.$$

Введение базовой матрицы позволяет:

- локализовать интересующие нас фрагменты топологии (при интерактивных переходах между блоками 03 → 04 и 08 → 09);
- оптимизировать путем введения локальных координат вычисления;
- ввести учет условного контура-маски.

Под оптимизацией мы имеем в виду производимый пересчет контуров — и их общего числа, и числа их вершин, и уменьшение по модулю координат вершин за счет перехода из абсолютной, сгенерированной исходным топологическим файлом/программой системы координат в относительную (по отношению к левому нижнему углу) матрицы M . Сужение множества контуров \mathfrak{K} формализуется так:

$$f_M: \mathfrak{K} \mapsto \mathfrak{K}_M(x_0, y_0) \equiv M_{m,1}(x_1, y_1) = M_{1,n}(\forall MT \in \mathfrak{K}_M)(\exists! T \in \mathfrak{K})(\forall (x, y) \in MT)(\exists (x, y)_i \in T) \quad (7)$$

$$((x, y) = (x, y)_i - (x_0, y_0)) \vee ((x, y) + (x_0, y_0) \in v(T)_i) \wedge ((x_0 < x < x_1) \wedge (y_0 < y < y_1)).$$

Каждой точке базовой матрицы поставим в соответствие некий объект, описывающий отношение этой точки к имеющимся в \mathfrak{K}_M контурам. Структура этого объекта и, соответственно, отношений может конкретизироваться далее; однако мы полагаем уместной следующую трехкомпонентную и параметрическую по малому ε структуру, предварительно пронумеровав контуры функцией g :

$$g: \mathfrak{K}_M \mapsto \omega h: p \in M \rightarrow \begin{pmatrix} \{g(\mathfrak{K}_M)\}_{in} \\ \{g(\mathfrak{K}_M)\}_{out} \\ \{g(\mathfrak{K}_M)\}_{\varepsilon} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

По отношению к произвольному контуру точка p , взятая на сетке базовой матрицы, может быть либо внутренней, либо внешней, либо граничной, т. е. находится на расстоянии, меньшем ε , от ребра контура. Подчеркнем, что определенную сложность составляет автоматический поиск внутренности контура (или хотя бы одной внутренней точки). Предлагаемая структура носит ярко выраженный булевый характер. Между тем в качестве альтернативы определения (8) можно предложить более сложный вариант, в котором ищется расстояние от точки до

контура (при этом для внутренних точек можно считать его отрицательным):

$$h:\{M\} \mapsto B(g(\mathfrak{K}_M))^3$$

$$\text{versus } H:\{M\} \times \mathfrak{K}_M \mapsto g(\mathfrak{K}_M) \times \mathfrak{K}. \quad (9)$$

При условной компарации можно сузить множество \mathfrak{K}_M , если есть дополнительный условный контур T_{cond} , до $\mathfrak{K}_M^* = \{T_1, T_2, T_{cond}\}$.

Формула (10) окончательно замыкает модель, возвращая нас к функциям компарации, участвующим в формуле (1). Выражения (11)—(12) представляют собой дальнейшие конкретизации, причем последнее за критерий берет площадь перекрытия контуров:

$$f_c(T_1, T_2) = F(H(p_1, \mathfrak{K}_M^*), \dots, H(p_{m^*n}, \mathfrak{K}_M^*))_{\forall p \in M} \quad (10)$$

$$f_c(T_1, T_2) = \sum_p \gamma_p (h(p, T_1), h(p, T_2)) h(p, T_{cond}); \quad (11)$$

$$f_c(T_1, T_2) = \sum_p \delta_{h_2(p)g(T_1)} \delta_{h_1(p)g(T_2)}. \quad (12)$$

Здесь δ — символ Кронекера, а γ_p — весовые коэффициенты (об актуальности их введения свидетельствует ситуация, изображенная на рис. 3).

Чисто формальным образом записывая скалярное произведение в формуле (11), мы хотели показать, что задача компарации двух контуров заменяется двумя задачами взаимосоотнесения "контур—точка". Формула (12) вычисляет поточечно площадь

тех участков контура T_2 , которые не лежат внутри контура T_1 .

Заключение

Нами предложена методика проведения компарации ОРС-методов, указаны возможные места вмешательства человека при автоматизации компарации. Сделана попытка математически формализовать процедуру компарации. Также нами разработан метод базовой матрицы, под который адаптирована схема работы компаратора. Вместе с тем, хотелось бы отметить, что несмотря на фундаментальный подход метод базовых матриц ресурсоемок при реализации на ЭВМ.

Список литературы

1. Родионов И. А., Макачук В. В. Методы коррекции оптических эффектов близости // Технология и конструирование в радиоэлектронной аппаратуре. 2007. № 3. С. 30—32.
2. Сэлмон Д. Сжатие данных, изображений и звука. М.: Техносфера, 2004. 368 с.
3. Курносенков И. Н., Тропченко А. Ю. Анализ современных стандартов сжатия видеоданных // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО: Информационные технологии: теория, методы, приложения. 2006. Вып. 32. С. 17—22.
4. Хмелев Р. В. Совместное использование структурного анализа и метрики Хаусдорфа при сравнении объекта и эталона // Компьютерная оптика. 2005. Вып. 27. С. 174—177.
5. Казанский Н. Л., Хмелев Р. В. Сравнение объекта и эталона по отклонению контуров // Компьютерная оптика. 2000. Вып. 20. С. 128—134.

УДК 621.382

Соловьев В. В., соискатель,
Московский государственный горный
университет,
E-mail: taplova_1@mail.ru

МОДЕЛЬ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ НАНОМЕТРОВОГО РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

Все большее применение алмазы и другие алмазоподобные твердые материалы находят в промышленности. Монокристаллы лейкосапфира благодаря своим свойствам находят широкое применение при производстве высокотехнологичных изделий в области нанотехнологий. Шероховатость поверхности подложки является важным параметром при изготовлении высокочастотных приборов. Наличие дислокаций, микротрещин приводит к образованию дефектов в эпитаксиальных слоях, ухудшая эксплуатационные свойства микросхем. Для изготовления указанных изделий необходима прецизионная обработка поверхности с получением нанометрового рельефа. Традиционная обработка представляет собой сложную технологическую схему с финишным полированием

в агрессивных средах. Перспективный метод квазипластичной обработки позволяет получать на этапе алмазного шлифования высококачественную поверхность.

Ключевые слова: лейкосапфир, микроэлектроника, квазипластичная поверхностная обработка, подложки, шероховатость

Обработка материалов является одной из важнейших областей деятельности человека и лежит в основе различных отраслей промышленности. Наряду с металлами в настоящее время все большее применение находят минералы. Кроме традиционных сфер применения в строительстве и ювелирной промышленности минералы, особенно в форме кристаллических образований (кристаллов), находят широкое применение при производстве высокотехнологичных изделий в области нанотехнологий [1].

Особое значение приобретает качество обработки поверхности с минимизацией отходов сырья для применения кристаллической формы минералов, в том числе алмаза и лейкосапфира, в микроэлектронике при изготовлении подложек интегральных микросхем (ИМС). С развитием микроэлектроники, микрохирургии, приборостроения и других отраслей промышленности при изготовлении изделий из этих минералов все более жесткими становятся требова-

ния к качеству поверхности (нанометровая шероховатость и минимум дефектов, привнесенных технологическим процессом обработки).

Подложка, изготовленная из кристаллов (кремния, лейкосапфира, алмаза и других твердых материалов), выполняет роль механического носителя и отводит теплоту от микросхемы в процессе ее работы. Поэтому для изготовления подложек применяются кристаллические материалы, обладающие большой твердостью и высокой теплопроводностью (лейкосапфир, алмаз). Полупроводниковые схемы на лейкосапфировых подложках изготавливают с применением эпитаксии. Эпитаксия — это метод послойного выращивания одного кристаллического твердого тела на поверхности другого (называемого подложкой), при котором растущий кристалл наследует кристаллографическую структуру подложки. Формирование поверхности нанометрового рельефа для последующего этапа эпитаксии таких материалов является большой проблемой. Качество поверхностного слоя подложек существенно влияет на структурное совершенство эпитаксиального слоя. От качества подложки зависит надежность работы микросхем. Дислокации и дефекты поверхностного слоя формируются и зависят от подложки и наследуют ее отрицательные свойства, ухудшая эксплуатационные свойства микросхем.

Традиционным способом обработки твердых хрупких материалов (в том числе кристаллов) является механическое шлифование свободным и связанным абразивом. После такой обработки получают заготовки с шероховатостью поверхности около 200 нм и нарушенным подповерхностным слоем. Для достижения необходимой шероховатости при изготовлении подложек применяются операции полирования и травления заготовки в агрессивных средах. При таком способе проблематично достижение стабильно повторяющихся параметров процесса обработки, высок процент брака ИМС, связанного с обработкой поверхностей подложек.

Перспективным способом получения высококачественной поверхности твердых хрупких кристаллических материалов нанометрового рельефа является удаление поверхностного слоя в режиме квазипластичности [2]. Квазипластичность — проявление пластичных свойств поверхностным слоем твердых хрупких материалов при обработке. Технология квазипластичной обработки твердых материалов основана на обеспечении механического воздействия на обрабатываемую поверхность материала при подаче шлифовального круга, составляющей доли мкм/ход. При этом поверхностный слой (ПС) хрупких твердых материалов проявляет пластичные свойства, и преобладающим механизмом становится не хрупкое разрушение, а квазипластичное удаление поверхностного слоя материала.

Механизм взаимодействия инструмента с кристаллом заключается в следующем. При внешнем упорядоченном воздействии ритмичного поля в виде периодических касательных напряжений со стороны режущих зерен вращающегося инструмента сум-

марно охватывается обрабатываемая поверхность на площади макромасштабного уровня. От возвратно-поворотных мод деформации материала в нем синхронно накапливается усталость и формируется однослойная ячеистая структура в виде множества трехмерных мезообъемов. Эти мезообъемы движутся в релаксационном режиме по схеме "сдвиг + материальный поворот". В конце периода синхронного накопления усталости исходная монокристаллическая структура трансформируется в поликристаллическую структуру, одновременно удаляемую со всей указанной площади в виде множества единичных пластически деформированных частичек основного кристалла. При этом на обработанной поверхности формируется структура приповерхностного слоя без дефектов хрупкого разрушения, внесенных процессом обработки [3].

Для моделирования поверхности нанометрового микрорельефа рассмотрено послойное квазипластическое удаление поверхностного слоя под действием усталостных напряжений возвратно-поворотных мод деформации. Задача решается в плоском приближении. Пусть δ — подача круга по вертикали. Если $\delta < h$, где h — средняя высота выступа образца (шероховатость), то столкновения выступов поверхности образца с зернами шлифовального круга будут происходить в слое толщиной δ (рис. 1).

На начальном этапе размер алмазных зерен шлифовального круга соизмерим с размером микронеровностей обрабатываемого материала (20 мкм). На заключительных этапах шлифования размер зерен шлифовального круга значительно превышает оставшиеся микронеровности, составляющие 2...10 нм. Примем средний диаметр части выступов образца и части зерен круга, попавших в этот слой, $d \approx \delta/2$.

Среднюю длину свободного пробега зерна между соседними выступами образца считаем равными l_{cp} :

$$l_{cp} = \frac{\sqrt{2}}{\pi n d^2} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi n \delta^2} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi n_0 \delta},$$

где n — средняя объемная концентрация зерен круга (шт/м³), $n = n_0/\delta$, при поверхностной плотности зерен круга n_0 (шт/м²). За время τ каждый выступ образца испытает N столкновений:

$$N = \frac{v\tau}{l_{cp}} = \frac{v\tau\pi n_0 \delta}{4\sqrt{2}},$$

где v — скорость шлифовального круга, м/с.

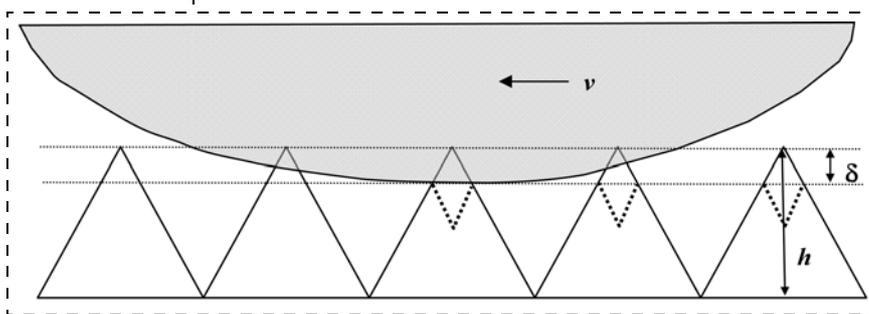


Рис. 1. Модель обрабатываемой поверхности

Так как шлифование происходит в квазипластичном режиме, то для накопления усталости и снятия слоя толщиной δ каждый выступ образца должен испытать множество столкновений с зернами круга N_0 . Чистое время снятия слоя толщиной δ (время пребывания образца под кругом) составит

$$\tau_1 = \frac{N_0}{N} = \frac{4\sqrt{2} N_0}{v\tau\pi n_0 \delta}.$$

Если отношение периода возврата образца под кругом к времени пребывания под кругом равно m , то общее время снятие слоя равно $\tau_{\text{общ}} = m\tau_1$.

Была проведена профилометрия исходной и конечной шероховатости обрабатываемой поверхности. Полученные данные свидетельствуют о сохранении формы выступов, что косвенно подтверждает факт, что дислокации при усталостном разрушении кристалла движутся в определенных кристаллографических плоскостях, сохраняя при этом неизменным угол при вершине каждого выступа.

Схему удаления поверхностного слоя кристаллического образца можно представить следующим образом (рис. 2).

Согласно предложенной схеме [4] при выбранном шаге подачи δ_0 за цикл снимается слой δ_0 , но нижняя часть (впадины) шероховатости перемещаются на $2\delta_0$. Это может продолжаться до тех пор, пока подача не станет порядка величины шероховатости. На это необходимо k_1 циклов, $k_1 = \left\lfloor \frac{h_0}{2\delta_0} \right\rfloor - 1$.

Здесь $\left\lfloor \frac{h_0}{2\delta_0} \right\rfloor$ — целая часть. С этого момента подача должна уменьшаться. Предположим, она будет уменьшаться по закону $\delta_{k_2} = \frac{\delta_0}{2^{k_2}}$. Тогда уменьше-

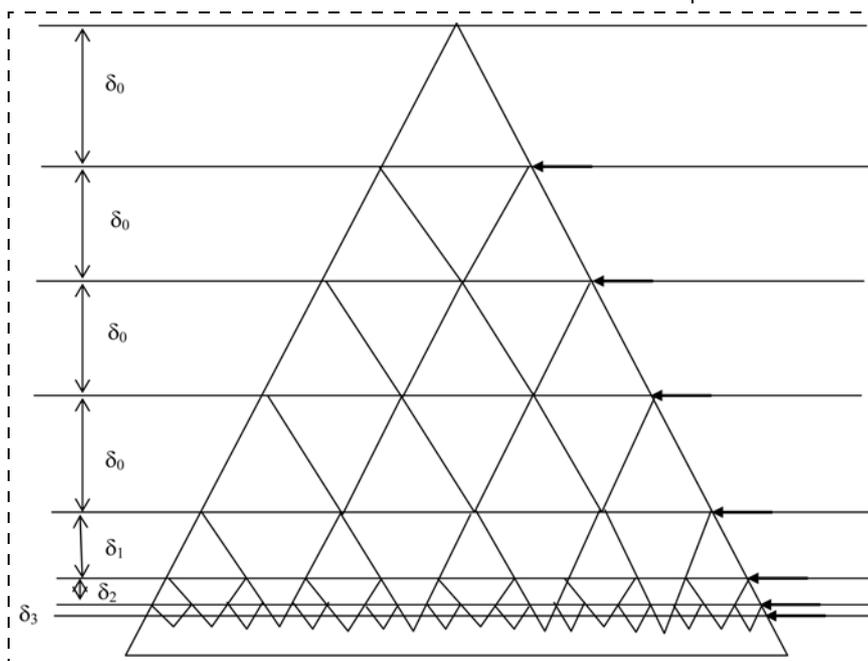


Рис. 2. Схема удаления поверхностного слоя при квазипластичной обработке

ние подачи будет продолжаться до тех пор, пока подача не сравняется с технически достижимой подачей шлифовального круга по вертикали δ_{min} . Число шагов k_2 , необходимых для этого, составляет

$$k_2 = \frac{\ln(\delta_0/\delta_{\text{min}})}{\ln 2}.$$

Общее число шагов, исчерпывающих технические возможности шлифовального станка, определяется выражением

$$k = \left\lfloor \frac{h_0}{2\delta_0} \right\rfloor - 1 + \frac{\ln(\delta_0/\delta_{\text{min}})}{\ln 2}.$$

Время такой "черновой" послышной обработки равно $\tau_{\text{обр}} = \tau_{\text{обр}k}$.

Дальнейшая обработка, состоящая в выхаживании, должна выполняться при нулевой подаче за счет линейного теплового расширения образца при условии $\delta_{\text{тепл}} < \delta_{\text{min}}$. Исходя из заданной шероховатости и возможностей станка можно вычислить число снимаемых слоев, время, необходимое на доведение заготовки до заданной шероховатости, и выбрать рациональный режим поверхностной обработки.

Оценка минимального размера шероховатости, которую возможно получить на используемом оборудовании, исходит из технически достижимой подачи шлифовального круга по вертикали δ_{min} . Высота получаемого выступа шероховатости $h_b \approx \delta_{\text{min}}/2 + \delta_{\text{тепл}}/2$. Дальнейшего снижения шероховатости при квазипластичной обработке можно добиться при нулевой подаче, создавая усилия прижима за счет теплового расширения образца. Оценочное значение минимальной возможной шероховатости R_z :

$$h_{\text{min}} \sim \delta_{\text{тепл}}/2;$$

$$\delta_{\text{тепл}} = \beta H \Delta T,$$

где β — средний коэффициент линейного расширения материала образца, K^{-1} ; H — толщина образца, м; ΔT — разница между интегральной средней температурой образца, К, и температурой окружающей среды, К.

Влияние теплового фактора является наиболее существенным при удалении поверхностного слоя материала в режиме квазипластичности. Его рост при жестком закреплении образца будет приводить к необходимости снижения начального усилия прижима, что обусловлено тепловым расширением образца и увеличением подвижности дефектов в энергетической области квазипластичного разрушения [5]. Рассмотрим энергетический баланс в системе "инструмент—обрабатываемый минерал" при поверхностной обработке минерала в режиме квазипластичности в упругой обрабатывающей системе (УОС) с жестким закреплением на примере поверхностной обработки на станочном модуле АН15ф4. При поверхностной обработке происходит периодическое поступление теплового потока.

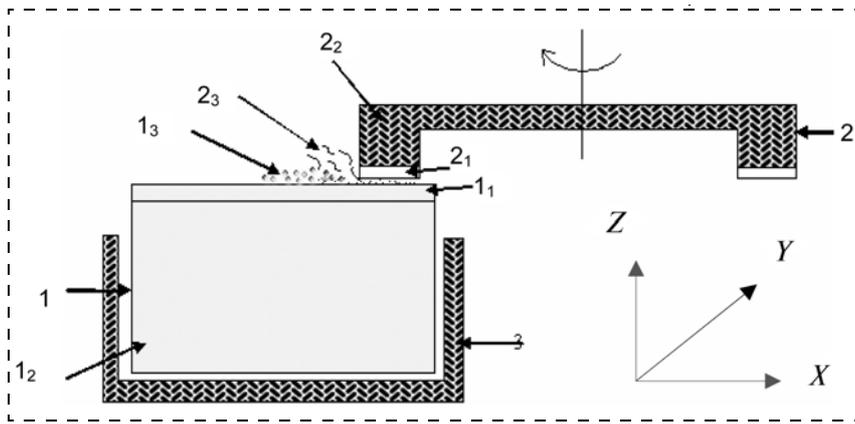


Рис 3. Система "инструмент—обрабатываемый минерал"

1 — образец; 1₁ — поверхностный слой; 1₂ — внутренний объем образца; 1₃ — пыль от обработки образца; 2 — шлифовальный круг; 2₁ — поверхностный слой шлифовального круга; 2₂ — внутренний объем шлифовального круга; 2₃ — пыль от шлифовального круга; 3 — державка

Обозначим $E_{вх}$ энергию, получаемую системой, вводимую при соприкосновении горизонтально вращающегося шлифовального круга с движущимся на столе станочного модуля вдоль оси X образцом минерала с горизонтально расположенной обрабатываемой поверхностью. При этом

$$E_{вх} = E_{вр.ШК} + E_{дв.X} + E_{вр.под},$$

где $E_{вх}$ — энергия, вводимая в систему; $E_{вр.ШК}$ — энергия, вводимая за счет вращения шлифовального круга; $E_{дв.X}$ — энергия, вводимая при движении стола по оси X , осуществляемого шаговым двигателем; $E_{вр.под}$ — энергия, получаемая системой при усилии прижима по вертикальной оси Z .

Все составляющие вводимой энергии задаются двигателями станочного модуля и могут быть определены по разности измеренной мощности холостого хода $N_{хх}$ и мощности при обработке образца $N_{обр}$ во время поверхностной обработки минерала при одном проходе образца под кругом. Схематично система "инструмент—обрабатываемый минерал" представлена на рис. 3. Введенная энергия в системе "инструмент—обрабатываемый минерал" расходуется на работу силы трения. Работа силы трения распределяется между инструментом, которым является шлифовальный круг, обрабатываемым минералом и УОС, в которой происходит размерно-регулируемая обработка минерала в режиме квазипластичности.

Нормальная составляющая усилия прижима (F_z) определяется выражением

$$F_z = k_{0упр} \Delta l_{об.0},$$

где $k_{0упр}$ — обобщенный коэффициент упругости всей системы, $H \cdot m^{-1}$; $\Delta l_{об.0}$ — длина образца по оси врезной подачи Z в начальный момент обработки. Работу силы трения можно выразить как

$$A_{тр} = F_z k_{тр} S,$$

где $k_{тр}$ — коэффициент трения между диском и образцом; S — площадь взаимодействующих поверхностей, m^2 .

Во время обработки при нагреве образца под действием работы силы трения в резуль-

тате теплового расширения его длина $\Delta l_{об}$ увеличится на величину $\Delta l_{тепл}$:

$$\Delta l_{об} = \Delta l_{об}^0 + \Delta l_{тепл},$$

что вызовет соответственные изменения нормальной составляющей силы прижима и работы силы трения:

$$A_{тр.1} = A_{тр} + \Delta A_{тр}.$$

При увеличении поступления теплового потока в результате работы силы трения $A_{тр}$ происходят нагрев образца и распространение теплового потока вдоль оси Z образца (рис. 4, а). Под действием теплового потока q с той же периодичностью вследствие теплового расширения возрастает усилие прижима кристалла к шлифовальному кругу и, следовательно, возрастает сила трения. При выходе образца из зоны реза-

ния происходят потеря теплоты с обрабатываемой поверхности, боковых поверхностей образца и отвод теплоты через державку образца $q_{тепл.п}$ (рис. 4, б). Когда действующая сила на единицу площади контакта превышает предел прочности обрабатываемого минерала на сдвиг, происходит скол (рис. 4, в). Чтобы не допустить скола минерала, необходимо рассчитать предельно допустимое усилие прижима и установить зависимость его изменения в процессе обработки от поступающего теплового потока. Для расчетов необходимо знать зависимость коэффициента теплового линейного расширения от температуры и для каждого обрабатываемого минерала определять критическую температуру, при которой тепловой поток в образце достигнет критического значения $q_{кр}$.

В работах Т. Б. Тепловой по проведенному анализу влияния тепловых процессов на процесс квазипластичного удаления поверхностного слоя твердых материалов [3, 4] предложен критерий хрупкого термического разрушения для ограничения предельной температуры обрабатываемой поверхности. Однако более критичный анализ полученных экспериментальных данных приводит к выводу о необходимости уточнения имеющейся физической модели этого процесса. Основанием к этому является то, что во многих экспериментах непосредственно под шлифовальным кругом наблюдался явный перегрев мес-

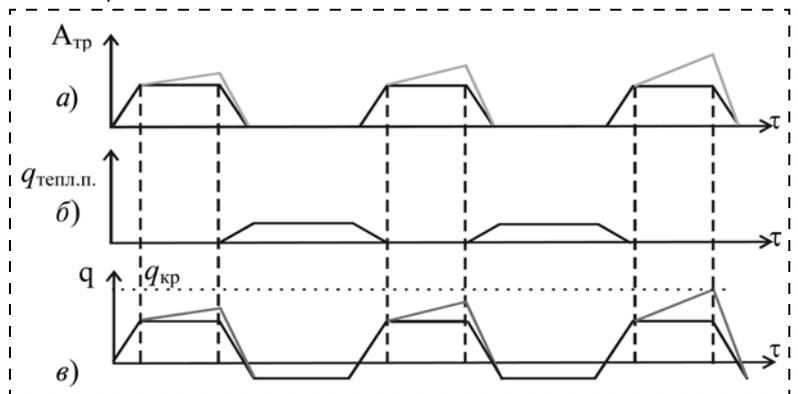


Рис. 4. Работа силы трения в процессе обработки

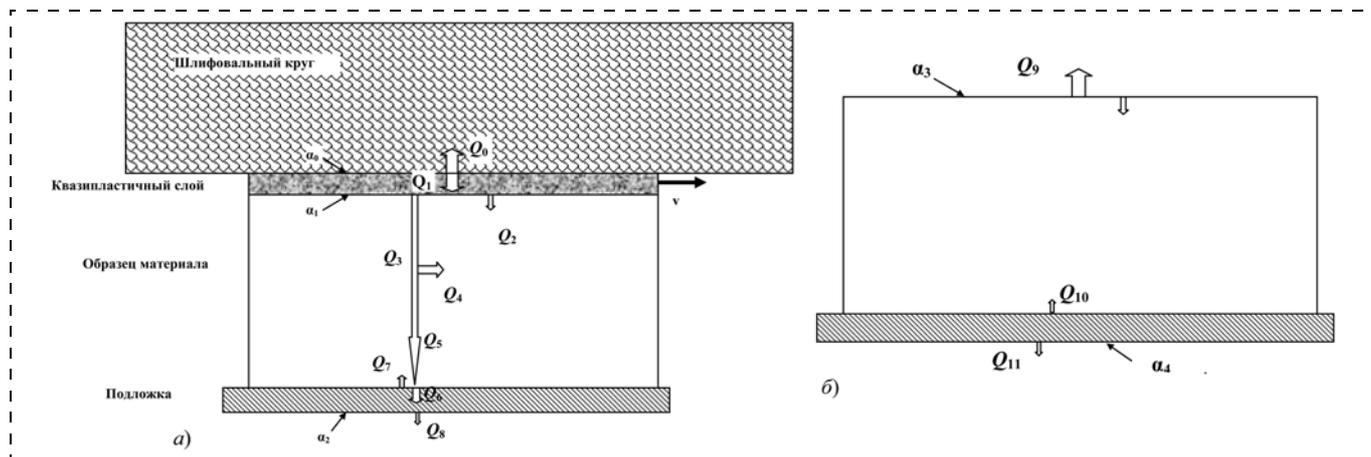


Рис. 5. Схема тепловых потоков при микрошлифовании твердых материалов:

а — в процессе обработки поверхности; *б* — в период нахождения вне обрабатывающего инструмента

та контакта инструмента с материалом, в то время как тепловизионный контроль показывал незначительный нагрев поверхности при выходе материала из контакта с инструментом. Числовые оценки показывают, что время контакта абразивного зерна инструмента размером порядка 10 мкм с единичным выступом (микронеровностью) поверхности материала составляет при линейной скорости инструмента относительно материала 40...50 м/с порядка 20 мкс. При этом тепловой контакт поверхностного квазипластического слоя материала с нижележащими слоями в значительной степени нарушен. Поэтому кондуктивный теплообмен между ними незначителен.

Теплообмен излучением также невелик, так как для лейкосапфира, например, полоса пропускания излучения находится в пределах от 0,2 до 5 мкм (на уровне 80 %), что свидетельствует о том, что тепловое излучение нагретой поверхности мало воздействует на нижележащие слои. При скорости продольной упругой волны в лейкосапфире 10^4 м/с глубина распространения ее за время соударения составит 2 мм, причем диссипация энергии этой упругой волны происходит на уже имеющихся в кристалле дефектах. На рис. 5 показана схема тепловых потоков при квазипластичном удалении поверхностного слоя при обработке. На рисунке приняты следующие обозначения:

Q_0 — тепловой поток от границы обработки к обрабатываемому инструменту;

Q_1 — тепловой поток от границы обработки к квазипластичному поверхностному слою;

Q_2 — тепловой (кондуктивный) поток от границы квазипластичного поверхностного слоя к ненарушенному материалу;

Q_3 — тепловой (лучистый) поток от границы квазипластичного поверхностного слоя к ненарушенному материалу;

Q_4 — часть теплового (лучистого) потока от границы квазипластичного поверхностного слоя к ненарушенному материалу, диссипирующего в материале;

Q_5 — часть теплового (лучистого) потока от границы квазипластичного поверхностного слоя к ненарушенному материалу, не диссипирующего в материале;

Q_6 — часть теплового (лучистого) потока от материала к подложке;

Q_7 — тепловой поток от подложки к материалу;
 Q_8 — тепловой поток от подложки в окружающую среду;

Q_9 — тепловой поток от материала в окружающую среду;

Q_{10} — тепловой поток от подложки к материалу;

Q_{11} — тепловой поток от подложки в окружающую среду;

α_i — соответствующие коэффициенты теплообмена.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что основная часть энергии, затраченной на квазипластичное удаление поверхностного слоя материала, расходуется в поверхностном слое, что приводит к его значительному перегреву. Фактически поверхностный слой можно представить как микрометровый слой другой фазы (подвижной температурно и механически модифицированной) в условиях нестационарного ограниченного теплообмена с основной массой материала. Такой вывод подтверждается численными решениями соответствующей математической модели. Следовательно, критерий хрупкого термического разрушения можно применять только для подповерхностного слоя, и критическая температура означает возможность распространения дефектов в глубь образца обрабатываемого материала.

Список литературы

1. Теплова Т. Б., Самерханова А. С. Тенденции развития применения твердых высокопрочных минералов в микроэлектронике, медицине и ювелирных изделиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 10. С. 338—346.
2. Теплова Т. Б. Перспективы технологии размерно-регулируемого шлифования твердых высокопрочных материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 1. С. 90—94.
3. Теплова Т. Б. Физико-технологические принципы получения нанометрового рельефа поверхности при обработке твердых хрупких материалов электронной техники // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 7. С. 33—37.
4. Теплова Т. Б. Теоретическая интерпретация процесса размерно-регулируемого микрошлифования твердых материалов. 2007. № 2. С. 363—370.
5. Теплова Т. Б. Исследование возможности обработки хрупких твердых кристаллических материалов электронной техники в режиме квазипластичности для совершенствования качества обрабатываемой поверхности // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 2. С. 45—47.

УДК 621.382

Е. М. Еганова, магистр, мл. науч. сотр.,
Э. Н. Воронков, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Институт нанотехнологий микроэлектроники
РАН, Москва
E-mail: eganovaem@mail.ru

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ ПЛЕНОК, СОДЕРЖАЩИХ НАНОЧАСТИЦЫ ЗОЛОТА

Приведены результаты изучения электрических характеристик пленок As_2Se_3 , содержащих наночастицы золота. Экспериментам предшествовал предварительный расчет зависимости электропроводности от объемного содержания наночастиц на основе стандартных моделей, используемых для композитных материалов. При сравнении экспериментальных данных с расчетными обнаружены значительные расхождения, которые указывают на взаимодействие структурной матрицы с внедренными наночастицами.

Ключевые слова: халькогенидные стеклообразные полупроводники, наночастицы, золото, электропроводность

Введение

Тонкие пленки стеклообразных широкозонных халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) обладают высоким сопротивлением, прозрачностью в видимой области спектра, низкой химической активностью. Высокое давление паров халькогенидных соединений и сравнительно низкая температура плавления позволяют для получения структур на их основе использовать низкотемпературные процессы. К достоинствам стеклообразных материалов следует также отнести отсутствие дефектов роста. Все это делает материалы данной группы перспективными для использования в качестве среды для получения в них активных наноструктур.

Целью данной работы являлось изучение электрических характеристик пленок As_2Se_3 , содержащих наночастицы золота. Экспериментам предшествовал предварительный рас-

чет зависимости электропроводности от объемного содержания наночастиц на основе стандартных моделей, используемых для композитных материалов. После выполнения экспериментов было проведено сравнение экспериментальных данных с расчетными. При этом обнаружены значительные расхождения, которые указывают на взаимодействие структурной матрицы с внедренными наночастицами.

Предварительный расчет

Предварительный расчет осуществлялся компьютерным моделированием регулярной двумерной сетки сопротивлений двух сортов — с высокой R_M и низкой проводимостью R_C . Соответствующие металлическим частицам сопротивления R_M внедрялись случайным образом в изначально заданную сетку с сопротивлением R_C . Отношение числа сопротивлений R_M к числу сопротивлений R_C принималось за объемную долю внедренного материала. Принималось, что все внедренные частицы прямоугольные, имеют одинаковые размеры и одинаковый аспектный коэффициент. При этом удельная проводимость компонента "м" принималась $2,3 \cdot 10^{-6} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$ и удельное сопротивление компонента "с" — $10^{-12} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$.

Изготовление образцов и методика эксперимента

Изготовление образцов включало две основные стадии:

- подготовка подложек и нанесение на них наночастиц золота;
- нанесение пленки As_2Se_3 и электродов к ней.

В качестве подложек использовали полированные кварцевые пластинки. Наночастицы золота на них получали по стандартной методике за счет коа-

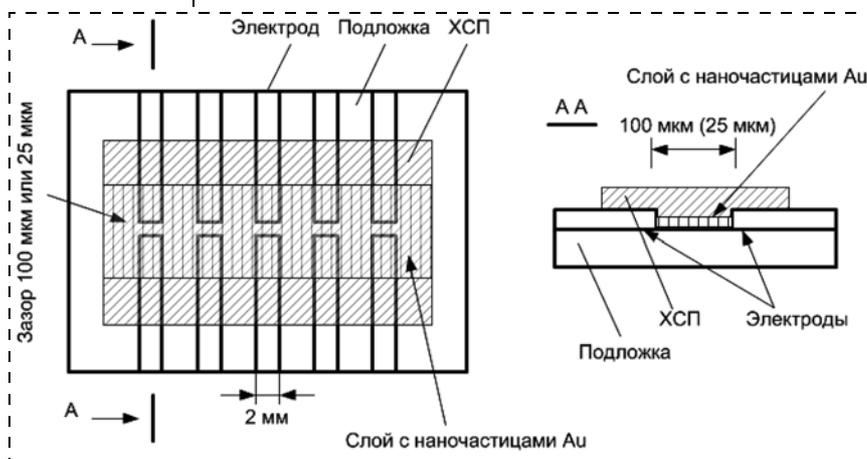


Рис. 1. Экспериментальные образцы

лесценции атомов золота при отжиге. Размер наночастиц зависел от толщины золотого слоя, времени и температуры отжига. Пленки As_2Se_3 наносили на втором этапе вакуумным напылением на холодные (300...350 К) подложки. Толщина пленки варьировалась в пределах 1...4 мкм. Поверх пленки ХСП (также на холодную поверхность) наносились планарные золотые электроды шириной 1 мм с межэлектродным расстоянием 100 (или 25) мкм.

Весь технологический цикл можно представить в виде последовательности основных операций:

- нанесение золота на кварцевую подложку;
- контрольное измерение сопротивления проводящего слоя;
- отжиг;
- контрольное измерение сопротивления;
- измерение рельефа поверхности с помощью атомного силового микроскопа;
- нанесение As_2Se_3 ;
- измерение толщины пленки ХСП;
- нанесение электродов;
- измерение сопротивления;
- измерение пробивного напряжения (поля);
- обработка экспериментальных результатов и сравнение их с расчетными.

Структура образцов схематически представлена на рис. 1.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показан пример топологии поверхности образца перед нанесением пленки ХСП. На рисунке видно, что наночастицы золота имеют столбчатую структуру с заостренным верхним концом. При этом дисперсия относительно среднего размера высокая. Данные, полученные с помощью атомного силового микроскопа, позволяли получить практически все основные характеристики наночастиц, вычислить их общий объем и степень покрытия поверхности.

Электрические характеристики измеряли как в вакууме, так и на воздухе с помощью пикоамперметра Keithley 6485 в автоматическом режиме с помощью управляющей платы National Instruments и программы, созданной в среде NI LabView. Сопротивление образцов в вакууме было на 10...20 % выше, чем на воздухе, однако общий характер зависимо-

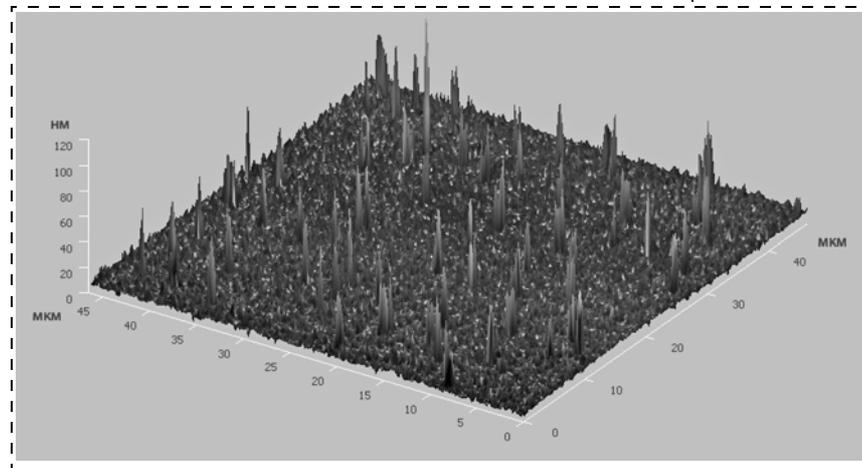


Рис. 2. Топология поверхности перед нанесением пленки As_2Se_3

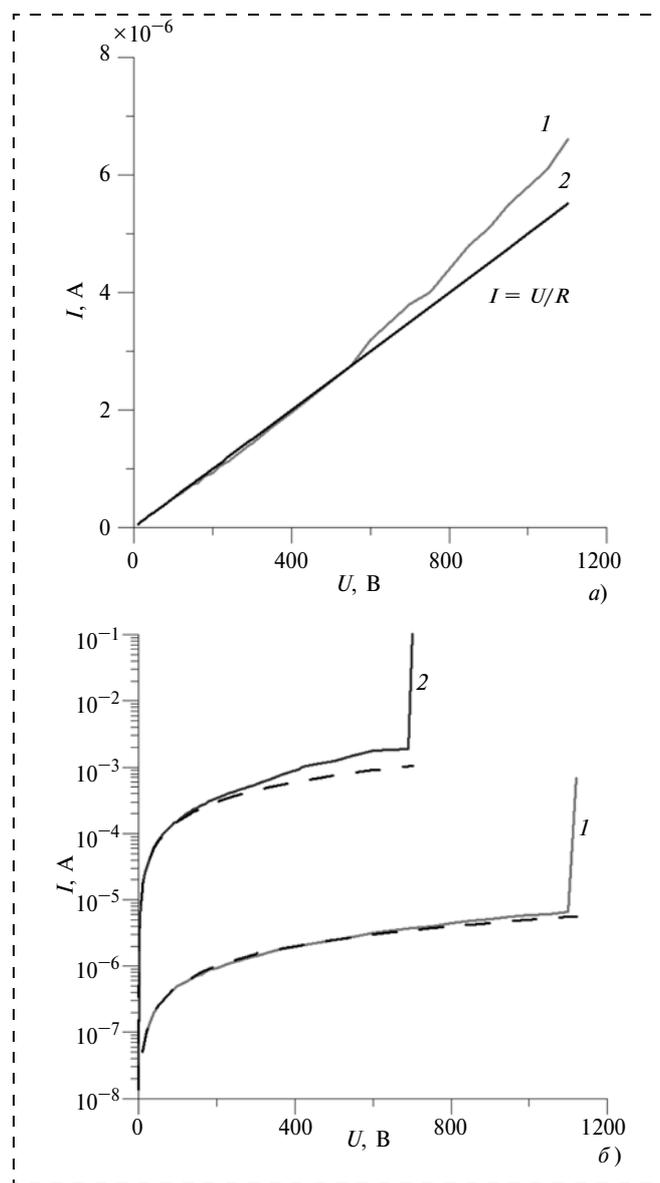


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики образцов:

a — образец с наночастицами (кривая 1 — экспериментальная, кривая 2 — теоретическая), *б* — кривая 1 — характеристика образца с наночастицами и без наночастиц — кривая 2

стей силы тока от напряжения был аналогичным. Типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов показаны на рис. 3. На рис. 3, *a*, кроме экспериментальной ВАХ образца нанесена ВАХ постоянного сопротивления, совпадающего по значению с сопротивлением образца при напряжениях, близких к нулю.

Измерения показали, что ВАХ в нелегированном образце As_2Se_3 является линейной до полей с напряженностью $\sim 4 \cdot 10^4$ В/см, после чего начинает возникать нелинейная зависимость, которая связана с увеличением подвижности дырок в сильных полях. При полях порядка $7 \cdot 10^4$ В/см начинается электрический пробой, связан-

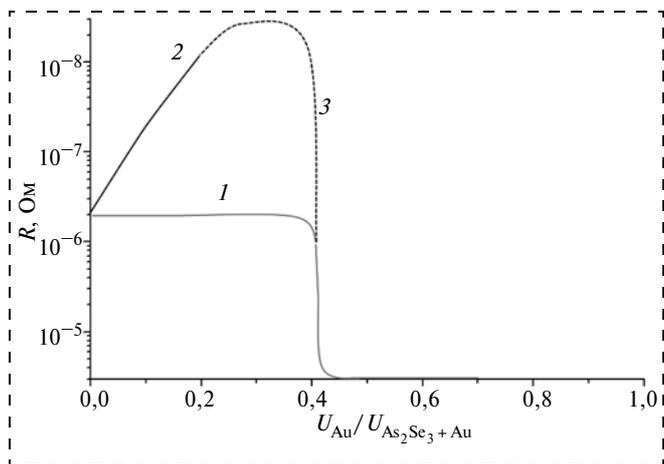


Рис. 4. Зависимость сопротивления образца от объемной доли инкорпорированных частиц:

1 — модельный расчет; 2 — эксперимент; 3 (штриховая часть) — ожидаемый вид зависимости при большом содержании наночастиц

ный, предположительно, с лавинным умножением. Введение наночастиц приводит к снижению проводимости образца и значительному увеличению пробивного поля (рис. 3, б), и это является одним из парадоксальных результатов эксперимента. Это подтверждается результатами, представленными на рис. 4.

Как видно из графиков рис. 4, если допустить отсутствие взаимодействия внедренных частиц с матрицей, как это допускалось в расчетах, то получится

кривая 1, типичная для систем с перколяционной проводимостью [1, 2]. Однако введение в пленку ХСП наночастиц золота приводит к постепенному уменьшению ее проводимости (участок 2), росту пробивного напряжения (см. рис. 3, б). Причина этого явления не связана с химическим взаимодействием Au и ХСП, поскольку вклад проводимости границ Au—ХСП ничтожен. К сожалению, выбранная методика формирования наночастиц не позволила приблизиться к перколяционному порогу, и ожидаемый ход экспериментальной зависимости на рис. 4 представлен пунктиром (участок 3).

В качестве одного из возможных предположений можно допустить, что металлические наночастицы в пленке приобретают заряд, который компенсируется зарядом ловушек в ХСП, в результате чего вокруг пленок возникают достаточно протяженные области пространственного заряда.

Заключение

Показано, что введение наночастиц золота в стеклообразные пленки As_2Se_3 приводит к уменьшению проводимости этих пленок и росту их электрической прочности.

Список литературы

1. Кирпатрик С. Теория и свойства неупорядоченных материалов. М.: Мир, 1977. Вып. 7. Новости физики твердого тела.
2. Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979.

УДК 621.797

С. И. Рембеза, Н. Н. Кошелева, Е. С. Рембеза, В. А. Буслов,

ГОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"
E-mail: vstu-pppe@mail.ru

ГАЗОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПЛЕНОК-КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ SnO_2 , ПОВЕРХНОСТНО ЛЕГИРОВАННЫХ ПЛАТИНОЙ

Приведены данные о газовой чувствительности пленок-композигов на основе диоксида олова с добавкой кремния, поверхностно легированных платиной. Установлено, что поверхностно легированные пленки-композиты обладают хорошей чувствительностью к газам-восстановителям и позволяют понизить температуру максимальной газовой чувствительности.

Ключевые слова: пленки диоксида олова, поверхностное легирование платиной, газовая чувствительность

Введение

С развитием науки и техники возникает проблема контроля качества воздушной среды, которая ре-

шается, в частности, с помощью датчиков токсичных и взрывоопасных газов [1]. Конструкция датчиков газов предусматривает наличие чувствительного элемента, в качестве материала которого используют оксиды металлов (ZnO , SnO_2 , TiO_2) [2]. Принцип действия датчиков газа основан на изменении их электрической проводимости в присутствии молекул определяемого газа. В воздухе на нагретой поверхности оксидного полупроводникового материала происходит хемосорбция молекул кислорода кислородными вакансиями. В присутствии контролируемого газа на поверхности полупроводника происходит окисление молекул газа и изменение электропроводности металлооксидного сенсора газов [3].

Для повышения селективности и газовой чувствительности сенсорных материалов и снижения рабочих температур часто используют объемное [4] или поверхностное легирование каталитическими и электроактивными примесями, например палладием или платиной. В случае поверхностного легирования в результате кратковременного распыления катализатора его атомы распределяются по поверхности готовой пленки диоксида олова в виде кластеров размером несколько нанометров [5]. Предполагается, что

кластеры платины могут катализировать специфические химические взаимодействия SnO_2 с газами и увеличивать активность поверхностных электронных состояний сенсора.

Цель данной работы — исследование влияния поверхностного легирования платиной на газовую чувствительность и селективность тонких пленок оксида олова.

Образцы и методика эксперимента

Тонкие (≈ 250 нм) пленки диоксида олова с добавкой 1 % кремния изготавливали методом магнетронного реактивного распыления оловянной мишени со вставками Si в атмосфере $\text{Ag} + \text{O}_2$. В качестве подложек использовали окисленный монокристаллический кремний без специального подогрева. В результате реакции Sn и Si с кислородом на подложку осаждалась пленка $\text{SnO}_2 : \text{SiO}_2$ с 1 ат. % кремния, что подтверждается методом рентгеновского микроанализа на приборе JXA-840. На установке магнетронного распыления (Оратория-5) после завершения синтеза пленки диоксида олова проводилось кратковременное распыление платиновой мишени в течение 10 и 30 с. Таким образом были изготовлены три группы образцов: № 1 (SnO_2 без легирования Pt); № 2 ($\text{SnO}_2 + 10$ с напыления Pt), № 3 ($\text{SnO}_2 + 30$ с напыления Pt). Рассчитанная по средней скорости роста металлической пленки (46,8 нм/мин) толщина слоев платины составила для образцов № 2 и № 3 примерно 7,8 и 23,4 нм соответственно. Толщину пленок диоксида олова определяли с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4. Электрическое сопротивление образцов измеряли методом Ван-дер-Пау в интервале температур 20...400 °C. Морфологию поверхности исследовали методом атомно-силовой микроскопии на установке NT MDT.

Газовую чувствительность S к определенной концентрации газа в воздухе определяли в замкнутом объеме 10 л по относительному изменению электросопротивления образца в чистом воздухе R_B и при наличии примеси газа R_T : $S = R_B/R_T$ [4].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

После изготовления пленки SnO_2 , по данным рентгеновской дифракции, имеют аморфную структуру. Для их кристаллизации применяют изотермический отжиг на воздухе при температуре 500 °C в течение 6 ч. После отжига температурная зависимость сопротивления пленки без напыления платины (образец № 1) и температурная зависимость сопротивления образца № 2 с напылением Pt в течение 10 с представлена на рис. 1. Как следует из рис. 1, исходное сопротивление образца № 2 почти вдвое меньше, чем у образца № 1.

Характер температурной зависимости поверхностного сопротивления, изображенной на рис. 1, имеет вид, типичный для полупроводников на ос-

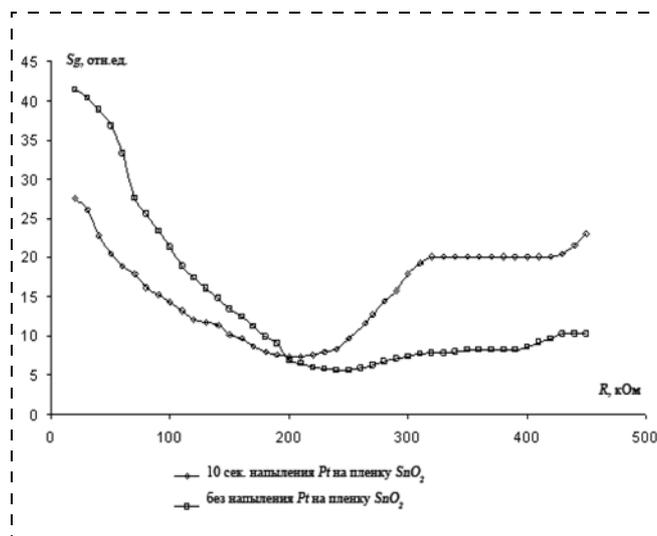


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления пленки-композиата $\text{SnO}_2 : \text{SiO}_2$ без напыления платины (образец № 1) и с напылением платины в течение 10 с (образец № 2)

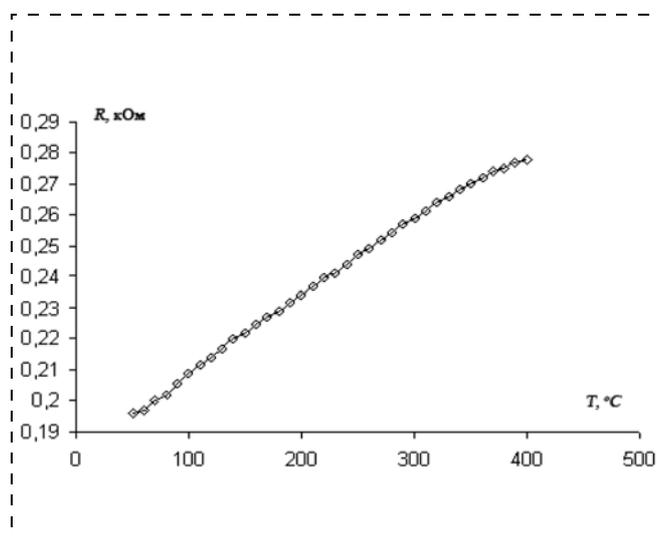


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления пленки-композиата $\text{SnO}_2 : \text{SiO}_2$ с напылением платины в течение 30 с (образец № 3)

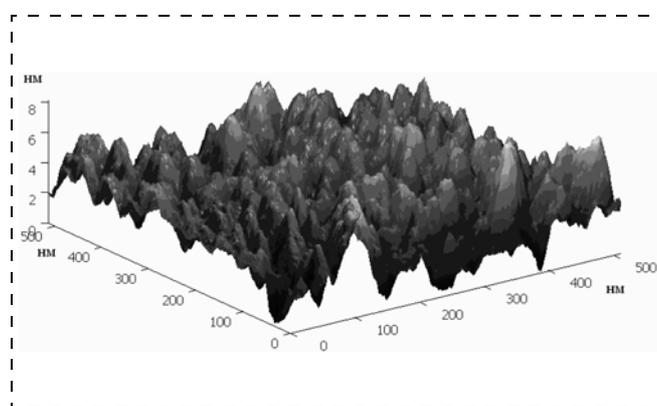


Рис. 3. АСМ-изображение морфологии поверхности образца № 1

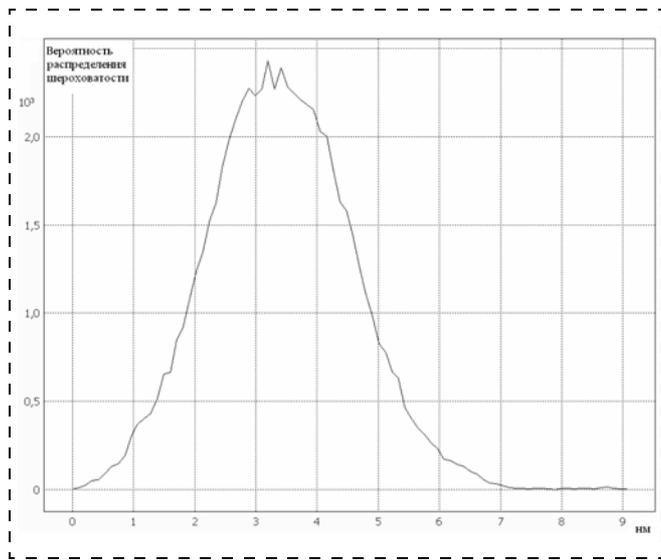


Рис. 4. Гистограмма плотности вероятности распределения шероховатости образца № 1

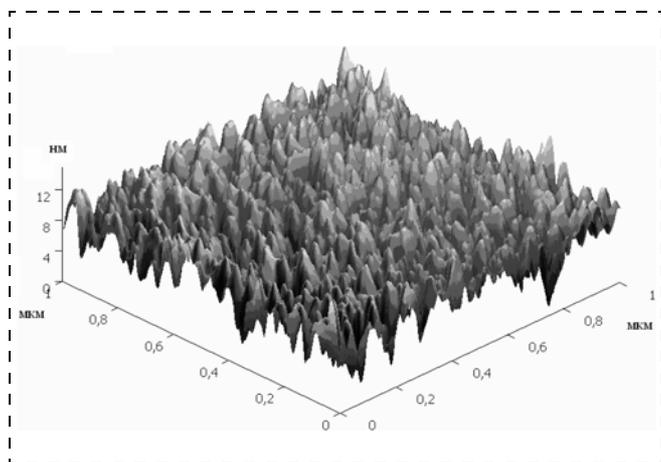


Рис. 5. АСМ-изображение морфологии поверхности образца № 2

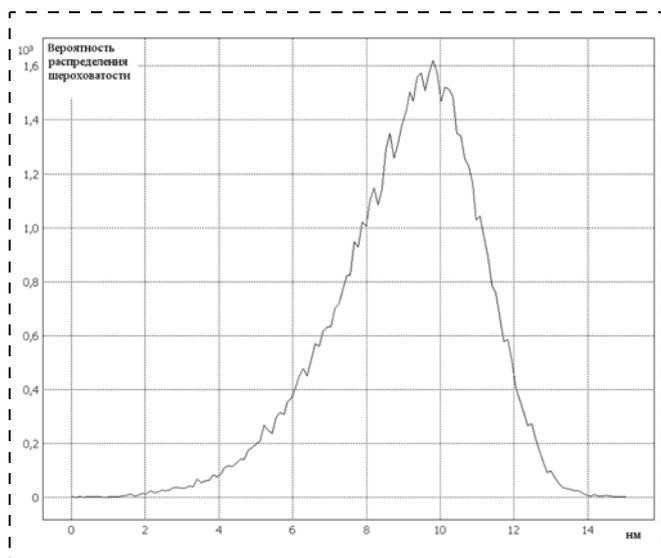


Рис. 6. Гистограмма плотности вероятности распределения шероховатости образца № 2

нове оксидов металлов: уменьшение сопротивления до температур 220 °С за счет ионизации доноров, затем повышение электрического сопротивления за счет изменения зарядового состояния адсорбированного кислорода (переход от O^- к O^{2-}) [6]. Распределение платины на образце № 2, по-видимому, имеет островковый характер. Температурная зависимость сопротивления образца № 3 с 30-секундным напылением платины (образец № 3) характерна для сплошной или кружевной структуры металлической пленки платины на поверхности диоксида олова и линейно растет с температурой (рис. 2). Это означает, что металлическая пленка платины шунтирует сопротивление пленки композита $SnO_2 : SiO_2$. Таким образом, образец № 3 для дальнейших исследований газовой чувствительности не представляет интереса.

Для выявления характера распределения платины по поверхности диоксида олова при разных временах распыления (10 и 30 с) была исследована морфология поверхности образцов № 1, № 2 и № 3.

На рис. 3 представлена морфология поверхности пленки диоксида олова без напыления платины (образец № 1).

На рис. 4 представлена гистограмма плотности вероятности распределения шероховатости для пленки диоксида олова для образца № 1, из которой следует, что наиболее вероятное значение шероховатости пленки составляет 3,5 нм. Этот результат соответствует полученным нами ранее данным о размере зерен $SnO_2 : SiO_2$ с 1 % кремния [7].

На рис. 5 представлена морфология поверхности пленки диоксида олова с осажденной на ее поверхности платиной в течение 10 с (образец № 2). Наличие отдельных кластеров платины должно изменить значение шероховатости пленки, если размеры кластеров не превышают поле сканирования АСМ.

На рис. 6 представлена гистограмма плотности вероятности распределения шероховатости для пленки диоксида олова образца № 2. Средняя шероховатость пленки составляет 9,5 нм. Этот результат подтверждает наличие на поверхности диоксида олова отдельных островков платины высотой 6—7 нм. Действительно, учитывая среднюю скорость распыления платины в данном технологическом процессе, равную 46,8 нм/мин, можно вычислить, что за 10 с на поверхности диоксида олова должно быть осаждено 7,8 нм платины, представляющей при указанных толщинах островковую структуру.

На рис. 7 представлена морфология поверхности пленки диоксида олова с осажденной на ее поверхности пленкой платины в течение 30 с. Если поверхность пленки в пределах поля сканирования равномерно покрыта платиной, то шероховатости поверхности, покрытой платиной, и исходной поверхности различаться будут незначительно.

Из гистограммы плотности вероятности распределения шероховатости для пленки диоксида олова (рис. 8) видно, что средняя шероховатость пленки составляет 3,3 нм, т. е. практически не отличается от

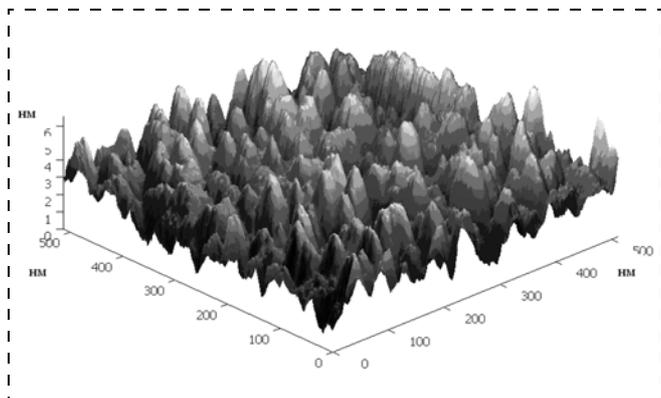


Рис. 7. АСМ-изображение морфологии поверхности образца № 3

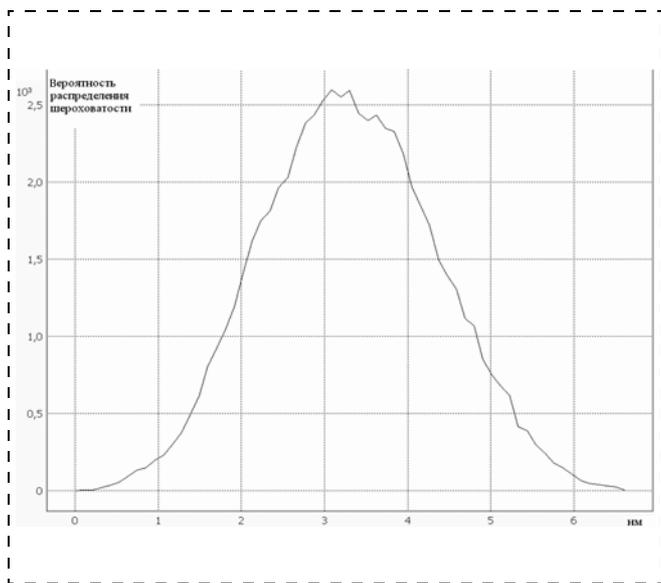


Рис. 8. Гистограмма плотности вероятности распределения шероховатости образца № 3

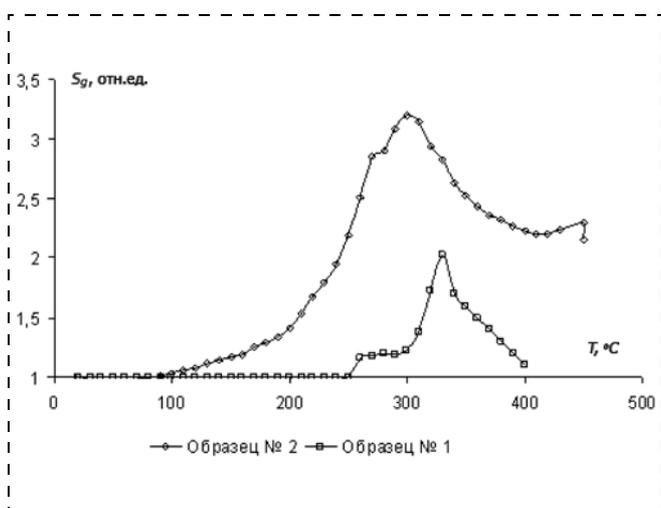


Рис. 9. Температурные зависимости газовой чувствительности к парам этилового спирта (1500 ppm) образцов № 2 и № 1

Температура максимальной газовой чувствительности образцов № 1 и № 2, °C

| Вид газа | Тип образца | |
|--------------------------------|------------------|---|
| | SnO ₂ | SnO ₂ с 10-секундным напылением Pt |
| Этиловый спирт (1500 ppm) | 330 | 300 |
| Изопропиловый спирт (1500 ppm) | 400 | 300 |
| Ацетон (1500 ppm) | 360 | 290 |
| Хлороформ (1500 ppm) | 390 | 290 |

шероховатости исходной пленки диоксида олова без наличия платины.

Этот результат может указывать на то, что исследованная методом АСМ область образца представляет собой равномерно запыленную тонким слоем платины поверхность диоксида олова.

Измерения газовой чувствительности к этиловому спирту, ацетону, хлороформу и изопропиловому спирту проводили на образцах № 1 и № 2. Экспериментально были получены температурные зависимости сопротивления на воздухе (R_B) и в парах исследуемого газа (R_T). По значению изменения сопротивления (R_B/R_T) определялось значение газовой чувствительности S_g и температура, при которой она максимальна.

На рис. 9 представлена температурная зависимость газовой чувствительности образцов № 1 и № 2 к парам этилового спирта в воздухе, из которой можно сделать вывод о температуре максимальной газовой чувствительности (300 °C) и о ее значении (3 отн. ед.). На основе полученных экспериментальных данных газовой чувствительности к парам этилового, изопропилового спирта, ацетона и формальдегида была определена температура максимальной газовой чувствительности образцов № 1 и № 2 (см. таблицу).

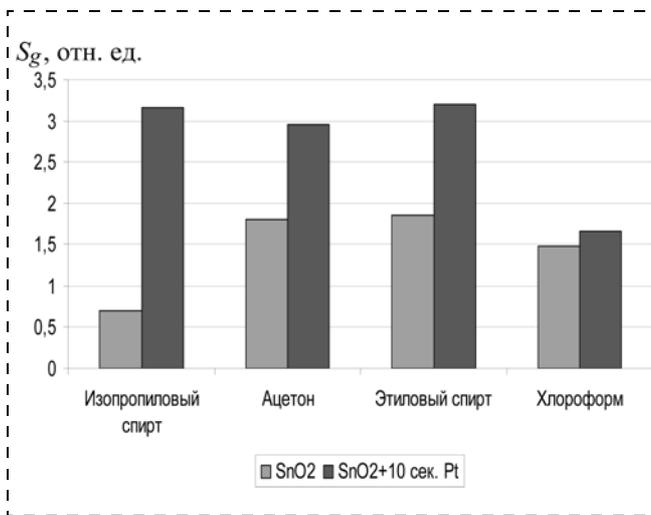


Рис. 10. Зависимость газовой чувствительности образцов № 1 и № 2 к различным газам при температуре 300 °C

В таблице приведены значения температуры максимальной газовой чувствительности, из которых видно, что при поверхностном легировании платиной, как и в случае объемного легирования [4], температура максимальной газовой чувствительности уменьшается. Например, температура максимальной чувствительности нелегированного диоксида олова к парам ацетона составляет 360 °С, а поверхностное легирование платиной снижает температуру до 290 °С. Температура максимальной чувствительности нелегированного диоксида олова к парам хлороформа составляет 390 °С, а поверхностное легирование платиной снижает температуру до 290 °С.

Нанесение платины приводит к увеличению значения газовой чувствительности при температуре 300 °С, что показано на рис. 10.

Островковое расположение кластеров Pt на поверхности пленки SnO₂ повышает адсорбционную активность поверхностных состояний не только за счет каталитического "spillover"-эффекта, но и за счет появления вокруг кластеров Pt обедненных областей в полупроводниковой сенсорной пленке вследствие того, что работа выхода электронов из платины больше, чем работа выхода из SnO₂.

Таким образом, пленки-композиты на основе диоксида олова, поверхностно-легированные платиной, являются перспективным материалом для создания датчиков, так как имеют хорошую чувствительность и позволяют понизить температуру максимальной газовой чувствительности на 30...100 °С, т. е. уменьшить энергопотребление.

Заключение

Методом реактивного магнетронного распыления металлической мишени в атмосфере Ar + O₂

синтезированы пленки SnO₂, поверхностно-легированные платиной. Исследована морфология поверхности и электрические свойства поверхностно-легированных пленок и контрольных, нелегированных, образцов SnO₂. Показано, что чувствительность поверхностно-легированных платиной пленок SnO₂ к газам-восстановителям имеет значительно большие значения при сравнимых температурах, чем для нелегированных пленок. Поверхностное легирование пленок SnO₂ платиной снижает температуру их максимальной чувствительности по сравнению с нелегированными образцами.

Список литературы

1. **Виглеб Г.** Датчики: устройство и применение М.: Мир, 1989. 196 с.
2. **Волькенштейн Ф. Ф.** Физико-химия поверхности полупроводников. М.: Наука, 1973. 400 с.
3. **Гутман Э. Е.** Влияние адсорбции свободных атомов и радикалов на электрофизические свойства полупроводниковых окислов металлов // Журн. физ. химии. 1984. Т. LVIII, Вып. 4. С. 801—821.
4. **Рембеза С. И., Свистова Т. В., Рембеза Е. С., Милащечко В. В.** Влияние примеси платины на свойства пленок диоксида олова, используемых в датчиках газов // Микросистемная техника. 2004. № 3. С. 21—24.
5. **Максимова Н. К., Катаев Ю. Г., Черников Е. В.** Структура, состав и свойства газочувствительных пленок SnO₂, легированных платиной и скандием // Журнал физической химии. 1997. Т. 71. № 8. С. 1492—1496.
6. **Kohl D.** Surface processes in the detection of reducing gases with SnO₂ — based devices // Sensor and Actuators. 1989. Vol. 18. P. 71—114.
7. **Рембеза Е. С., Рембеза С. И., Свистова Т. В., Дырда Н. Н.** Методы повышения газочувствительных свойств пленок SnO₂ для датчиков газов // Известия вузов. Электроника. 2006. № 1. С. 3—8.

УДК 621.486

Д. В. Козлов¹, аспирант,
И. П. Смирнов¹, нач. группы,
А. С. Корпухин¹, аспирант,
А. А. Жуков¹, д-р техн. наук, доц., нач. отдела,
e-mail: and_zhukov@mail.ru,
П. Г. Бабаевский², д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
e-mail: pgbabayevs@mail.ru,
А. Г. Сухоруков³, зам. нач. отдела,
e-mail: ntuot@roscosmos.ru,

¹ Открытое акционерное общество "Российская корпорация космического приборостроения и информационных систем",

² "МАТИ" — Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского,

³ Федеральное космическое агентство

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МНОГОЦИКЛОВОГО ИЗГИБА НА ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРУГО-ШАРНИРНЫХ БАЛОК ТЕПЛОВЫХ МИКРОАКТЮАТОРОВ

Предложена методика и проведена оценка влияния многоциклового изгиба на термодформационные характеристики упруго-шарнирных балок тепловых микроактюаторов после воздействия заданного числа циклов нагружения. Показано, что угол термодформации при нагревании микроактюатора после усталостных циклических испытаний в течение $5 \cdot 10^6$ циклов снижается приблизительно на 15 %, а после $3,2 \cdot 10^7$ — на 25 %. Предложенная методика и полученные результаты дают возможность оценивать жизнеспособность актюаторов и стабильность их характеристик в процессе эксплуатации, а также влияние "старения" балок на эти характеристики.

Ключевые слова: тепловой микроактюатор, упруго-шарнирные балки, полиимид, кремний, многоциклового изгиб, начальная и рабочая термодформации

Введение

В качестве исполнительных элементов микроробототехнических систем, обеспечивающих управляемое усилие или деформацию (смещение), в настоящее время наиболее широкое применение находят различные типы микроактюаторов, отличающихся по конструкции (балочные, роторные,

мембранные, гребневые) и по способу активации движения подвижных элементов (магнитные, пьезоэлектрические, термомеханические, электростатические и др.) [1, 2]. При этом наибольшие усилия и деформации способны развивать тепловые микроактюаторы, функционирующие на основе биморфного термоупругого эффекта и сочетающие сравнительную простоту в технологии изготовления и универсальность в применении [3–6]. Основным элементом таких микроактюаторов является биморфная консольная балка, определяющая надежность и стабильность их функциональных характеристик. В данной работе представлена методика и приведены предварительные результаты исследования стабильности термодформационных характеристик упруго-шарнирных балок тепловых микроактюаторов после воздействия многоциклового изгиба при заданном температурно-частотном режиме.

Экспериментальная часть

Объектами исследования служили образцы тепловых микроактюаторов, выполненные по технологии, изложенной в работе [7], и состоящие из рамки с мезаструктурой в монокристаллическом кремнии и термодформируемой упруго-шарнирной слоистой балки, консольно-закрепленной в рамке и образованной из плоских кремниевых стержней трапециевидного сечения и полиимидных (ПИ) слоев, которые адгезионно связывают кремниевые элементы через упруго-шарнирные узлы (рис. 1, *a–z*). В процессе формирования упруго-шарнирная балка вследствие термоусадочных эффектов в ПИ слое отклоняется от плоскости рамки вверх (в сторону ПИ слоя) на начальный угол α_0 , значение которого определяется геометрическими параметрами балки, режимами ее изготовления и температурой, при которой фиксируется начальный угол. Значение угла α_0 при комнатной температуре обычно варьируется от 60 до 80°. Вследствие большой разности в температурных коэффициентах линейного расширения ПИ (от $2 \cdot 10^{-5}$ до $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и кремния ($2,33 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) при нагревании упруго-шарнирной балки угол ее изгиба уменьшается, а при охлаждении увеличивается относительно начального угла. Разность фактического угла деформации балки при соответствующей температуре и начального угла (или их тангенсов) характеризует эффективную термодформацию балки.

Для многоциклового изгиба балки микроактюатора при заданном температурно-частотном режиме

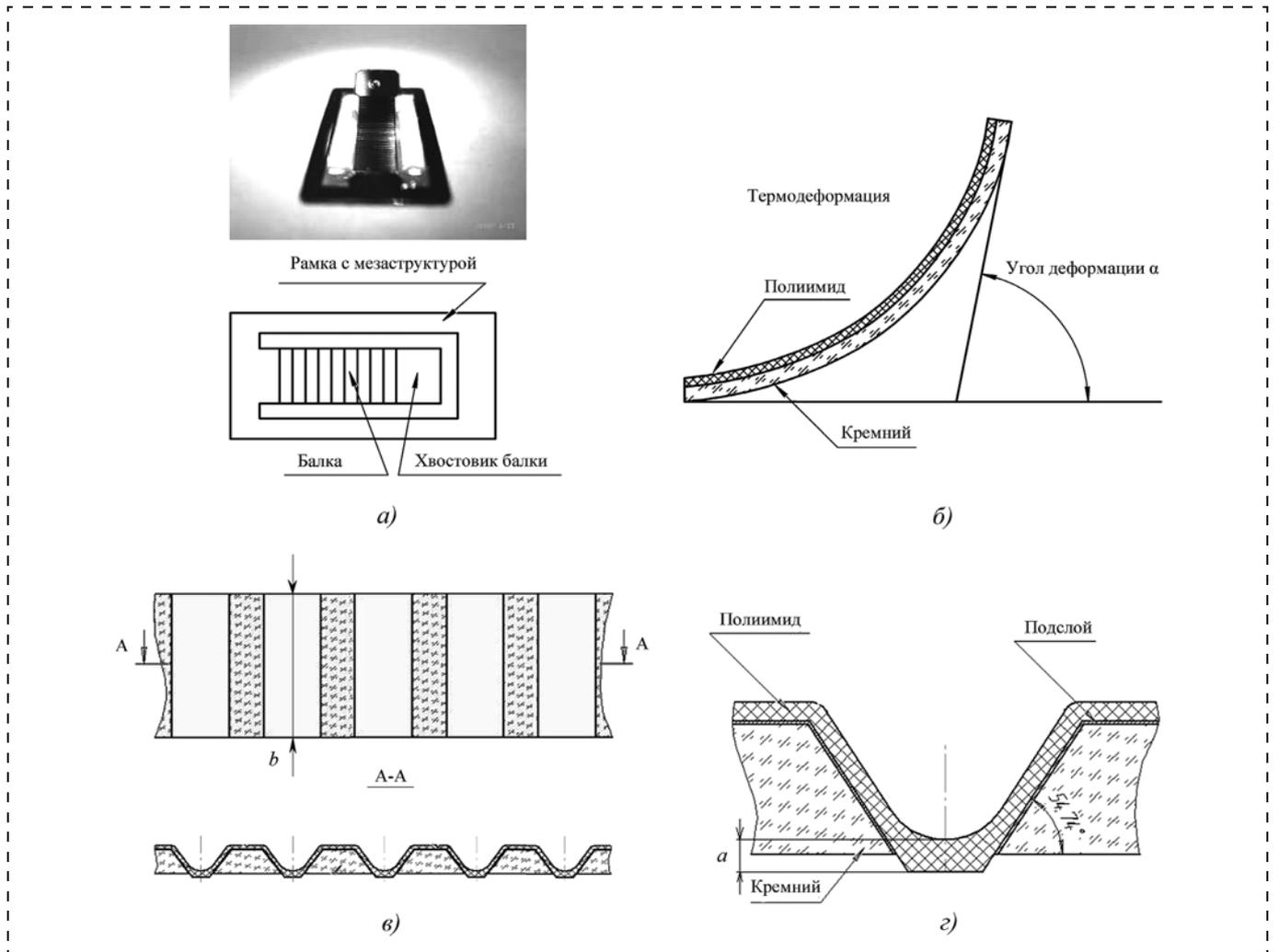


Рис. 1. Фотография образца элемента микроактюатора и схематические изображения его составных частей (а), изгиба балки (б), ее структуры (в) и упруго-шарнирного элемента (г)

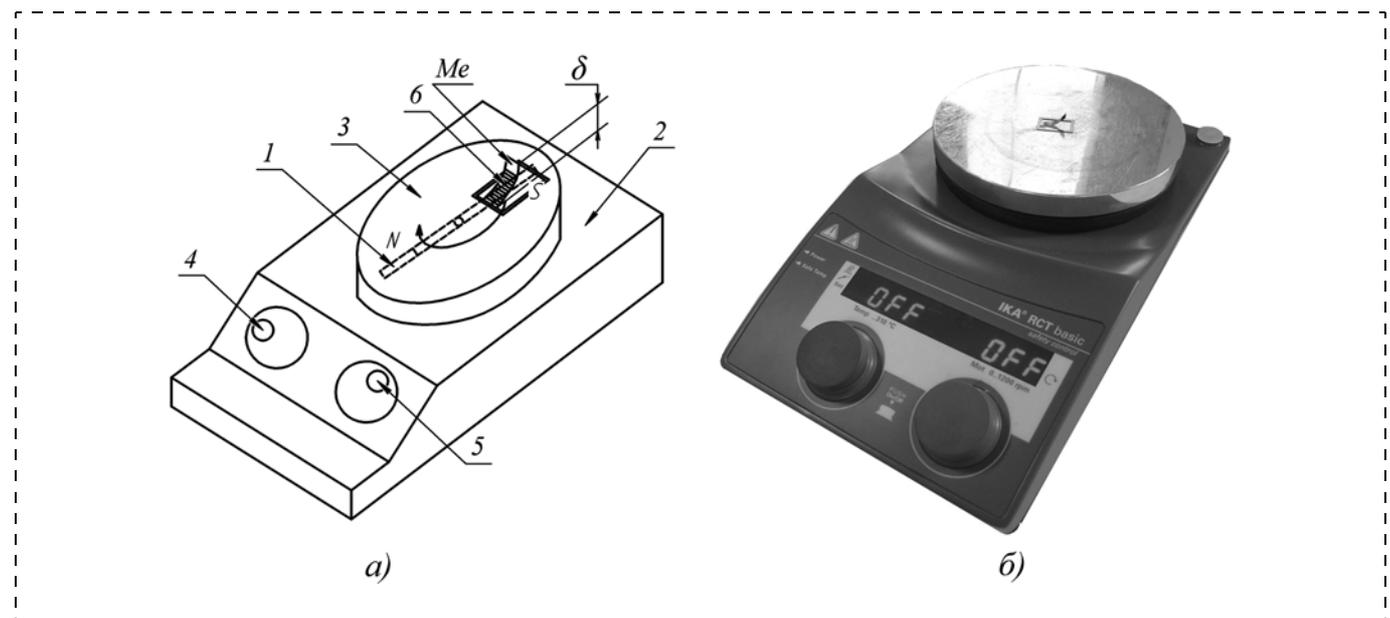


Рис. 2. Схема (а) и фотография установки (б) для проведения испытаний на многоцикловую усталость балок микроактюаторов

разработана установка на основе магнитной мешалки с функцией нагрева IKA RCT BASIC (рис. 2). Магнит 1, заключенный в корпусе магнитной мешалки 2, находится под поверхностью нагреваемого столика 3. Магнит расположен на балке, вращающейся относительно центра столика. С помощью регуляторов 4 и 5 задается температура столика (от 293 до 583 К) и частота вращения магнита (от 50 до 1200 об/мин) соответственно. Температуру и частоту вращения измеряли соответственно с помощью цифрового термометра (погрешность датчика $\pm 0,15$ К, погрешность на поверхности плитки ± 5 К) и тахометра (погрешность датчика ± 2 %), встроенных в магнитную мешалку.

Исследуемый актюатор 6 расположен на нагреваемом столике магнитной мешалки так, что хвостовик балки находится над одним из концов магнита. На хвостовик балки актюатора приклеена никелевая пластина, притягиваемая магнитом. При вращении магнита с заданной скоростью балка в момент его прохода под хвостовиком притягивается и совершает изгибные колебания, частота которых пропорциональна угловой скорости магнита.

Для испытаний использовали два типа образцов микроактюаторов, в которых балки при ширине $b = 6,7$ мм (см. рис. 1, в) имели 39 и 50 трапецевидных канавок и толщину полиимидного слоя $a = 30$ и 39 мкм (см. рис. 1, г) соответственно. Многоцикловый изгиб проводили при температуре 373 К и частоте вращения магнита 260 об/мин, что соответствовало частоте колебаний балки в 8–9 Гц. После заданного числа циклов изгиба образцы охлаждали до комнатной температуры и определяли начальные углы деформации балок относительно плоскости рамки при этой температуре и их изме-

нения при нагревании в термошкафу от комнатной температуры до 473 К и при охлаждении в жидком азоте до 100 К (угол термодформации). Углы деформации балок определяли с помощью гониометра по методике, изложенной в работе [8]. При этом абсолютная погрешность определения угла деформации балки составляет $0,1^\circ$, а температуры — 2,2 К. Экспериментально было установлено, что актюатор входит в установившийся режим примерно через 100 циклов, поэтому проведение измерений начинали после первых 100 циклов работы актюатора.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3, а и 4, а приведены примеры температурных зависимостей угла деформации балки двух типов образцов актюаторов относительно плоскости рамки при нагревании до 473 К и при охлаждении до 100 К от комнатной температуры после различного числа циклов испытания на усталостный изгиб для первого и второго типов образцов соответственно. Полученные данные о влиянии многоциклового изгиба при температуре 373 К на абсолютные изменения углов деформации при термодформационных испытаниях, а также на начальные углы деформации балок после заданного числа циклов изгиба обобщены на рис. 3, б и 4, б для первого и второго типов образцов соответственно.

Приведенные данные показывают, что упругошарнирные слоистые балки "кремний—ПИ" изменяют начальный угол деформации относительно плоскости рамки и термодформационные характеристики как при нагревании до 473 К, так и при охлаждении до 100 К после усталостных циклических испытаний до $3,2 \cdot 10^7$ циклов изгиба при 373 К и

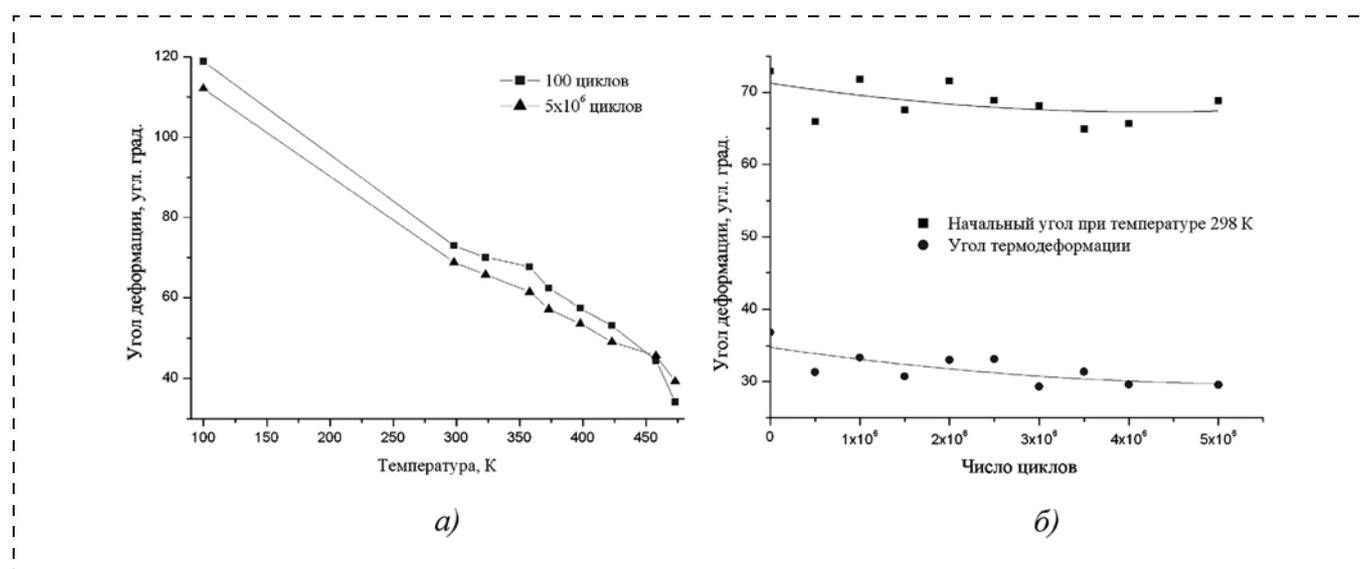


Рис. 3. Температурные зависимости угла деформации балки актюатора от плоскости рамки при нагревании до 473 К и при охлаждении до 100 К от комнатной температуры после различного числа циклов испытания на усталостный изгиб для 1-го образца (а); влияние многоциклового изгиба на термодформационные характеристики 1-го образца микроактюатора (б)

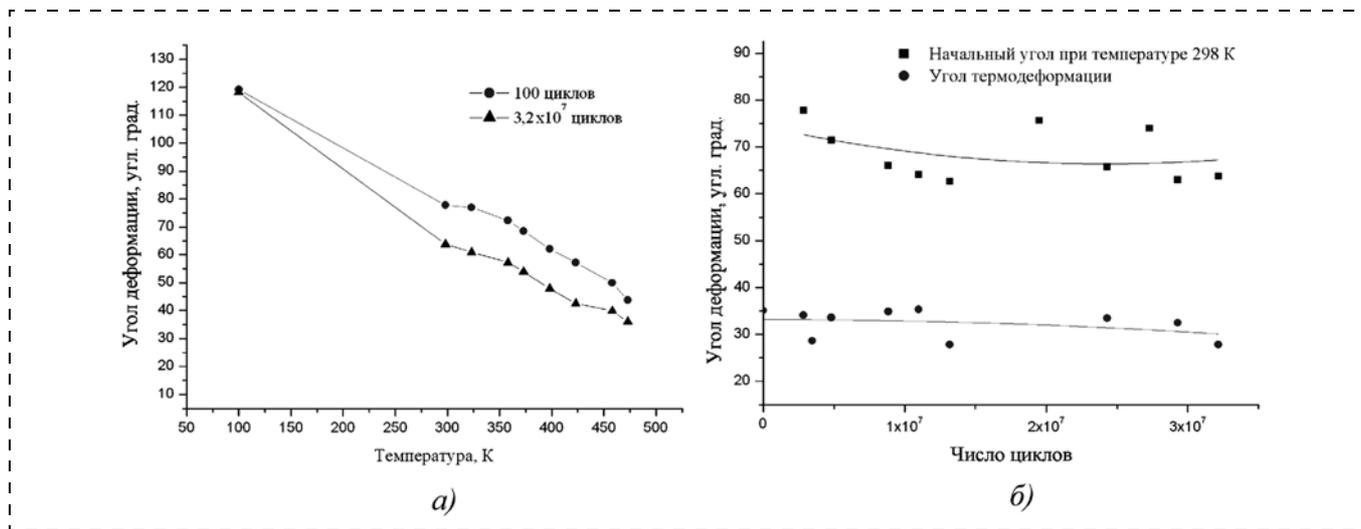


Рис. 4. Температурные зависимости угла деформации балки актюатора от плоскости рамки при нагревании до 473 К и при охлаждении до 100 К от комнатной температуры после различного числа циклов испытания на усталостный изгиб для 2-го образца (а) и влияние многоциклового изгиба на термдеформационные характеристики 2-го образца микроактюатора (б)

частотах около 8—9 Гц и при этом сохраняют свою работоспособность. После $5 \cdot 10^6$ циклов уменьшение начального угла деформации балки от плоскости рамки при комнатной температуре для испытанного образца не превышает 7° , а разброс углов деформации от начального вследствие термдеформаций при охлаждении и нагревании не превышает 4 и 6° соответственно. После $3,2 \cdot 10^7$ циклов уменьшение начального угла деформации балки относительно плоскости рамки при комнатной температуре для испытанного образца не превышает 15° , а разброс углов деформации от начального вследствие термдеформаций при охлаждении и нагревании не превышает 15 и 9° соответственно. Очевидно, что наблюдаемое некоторое изменение термдеформационных характеристик после многоциклового испытания при повышенной температуре связан, в первую очередь, с эффектами отжига/закалки или термического "старения" ПИ слоя.

Заключение

Таким образом, проведена оценка влияния многоциклового изгиба на термдеформационные характеристики упруго-шарнирных балок тепловых микроактюаторов, которая показывает, что угол термдеформации при нагревании микроактюатора после усталостных циклических испытаний в течение $5 \cdot 10^6$ циклов снижается приблизительно на 15% , а после $3,2 \cdot 10^7$ циклов — приблизительно на 25% .

Полученные данные и их анализ показывают, что предложенная методика многоциклового усталостных испытаний балок тепловых микроактюаторов при заданной температуре, частоте и амплитуде в сочетании с оценкой термдеформационных характеристик балок при нагревании и охлаждении после

воздействия заданного числа циклов изгиба дает возможность судить о жизнеспособности актюаторов и стабильности их характеристик в процессе эксплуатации и оценивать влияние "старения" компонентов балок на эти характеристики.

Работы выполнены в рамках проекта РФФИ № 10-02-01336-офи_а.

Список литературы

1. Gardner J., Varadan V., Awadelkarim O. Microsensors, MEMS, and Smart Devices. Chichester: John Wiley & Sons, LTD. 503 p.
2. Springer Handbook of Nanotechnology / Ed. Bharat Bhushan. 2nd Edition. Berlin: Springer, 2007. 1916 p.
3. Ebfors T. Polyimide V-groove Joints for Three-Dimensional Silicon Transducers: PhD thesis. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2000. 144 p.
4. Ebfors T., Kalvesten E., Stemme G. Dynamic Actuation of Polyimide V-grooves Joints by Electrical Heating // Sensors and Actuators. 1998. V. 67. P. 199—204.
5. Жуков А. А., Корпухин А. С., Гринькин Е. А. Микро-системный биморфный привод устройств космической робототехники: Труды 19-й Всероссийской НТК "Экстремальная робототехника". Санкт-Петербург: ГНЦ "Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК)", 2008. С. 126—127.
6. Тимошенко С. П., Жуков А. А., Захаров А. А. Биморфный балочный актюатор с V-образными полиимидными канавками // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 60—64.
7. Тепловой микромеханический актюатор и способ его изготовления: заявка на патент № 2010111378.
8. Жуков А. А., Козлов Д. В., Корпухин А. С., Смирнов И. П. Методика измерений деформационных характеристик микроактюаторов: Сборник статей Второй Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий". М.: Радиотехника, 2010 (в печати).

В. Я. Распопов, д-р техн. наук, проф., зав. каф.,
В. В. Матвеев, канд. техн. наук, доц.,
В. В. Лихошерст, канд. техн. наук, доц.,
Р. В. Алалуев, канд. техн. наук, доц.,
Ю. В. Иванов, д-р техн. наук, проф.,
А. П. Шведов, аспирант,
С. И. Серегин, магистрант,
 ГОУ ВПО "Тулский государственный университет"
 E-mail: tgupu@yandex.ru

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ДЛЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПО КРЕНУ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ¹

Исследуется возможность использования микромеханических гироскопов и акселерометров на борту вращающихся по крену беспилотных летательных аппаратов. Предлагается алгоритм получения измерительной информации для решения задач стабилизации и управления вращающимися по крену летательными аппаратами.

Ключевые слова: микромеханические датчики, ракета, бесплатформенная инерциальная навигационная система, косоугольный измерительный базис

Введение

Развитие беспилотных летательных аппаратов (ЛА) предъявляет к информационно-измерительным системам ориентации, помимо точности, требования по уменьшению массогабаритных характеристик, снижению энергопотребления и стоимости. Выполнение перечисленного комплекса требований возможно с применением микрогироскопов (МГ) и микроакселерометров (МА). Особый класс среди ЛА образуют беспилотные, вращающиеся относительно продольной оси с частотой от 6 до 20 Гц и со временем полета не более одной минуты. Для определения параметров ориентации таких объектов могут быть использованы системы ориентации на базе МГ, так как они обеспечивают удовлетворительные точностные характеристики на протяжении нескольких десятков секунд, что соответствует времени полета таких ЛА. Однако применение МГ на таких объектах вызывает затруднения, связанные с измерением угловой скорости крена $\dot{\gamma}$, так как современные МГ имеют диапазон измеряемых угловых скоростей не более 1000 °/с.

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-08-00230 "Научные основы построения малогабаритных систем ориентации и навигации для беспилотных вращающихся по крену летательных аппаратов".

Информационно-измерительная система ориентации с косоугольным измерительным базисом для вращающихся по крену ЛА

Для преодоления этой трудности можно использовать два МГ, оси чувствительностей которых x_A и x_B развернуты на угол ϵ относительно оси z_C (рис. 1).

Таким образом, МГ образуют косоугольный измерительный базис и измеряют не саму угловую скорость крена $\dot{\gamma}$, а ее проекции на оси x_A и x_B .

В этом случае для малого угла тангажа θ и соотношения угловых скоростей $\dot{\gamma} \gg \dot{\psi}$, где $\dot{\psi}$ — угловая скорость рыскания, угловая скорость крена $\dot{\gamma}$ может быть определена по зависимости

$$\dot{\gamma} \approx \frac{\omega_A + \omega_B}{2 \sin \epsilon},$$

где ω_A, ω_B — проекции угловой скорости на оси x_A и x_B .

В свою очередь, фильтруя составляющие разностей

$$(\omega_A - \omega_B) \cos \gamma = 2(\dot{\psi} \cos \gamma + \dot{\theta} \sin \gamma) \cos \gamma \cos \epsilon = 2(\dot{\psi} \cos 2\gamma + \dot{\theta} \sin 2\gamma) \cos \epsilon, \quad (1)$$

$$(\omega_A - \omega_B) \sin \gamma = 2(\dot{\psi} \cos \gamma + \dot{\theta} \sin \gamma) \sin \gamma \cos \epsilon = 2(\dot{\theta} - \dot{\theta} \cos 2\gamma + \dot{\psi} \sin 2\gamma) \cos \epsilon, \quad (2)$$

меняющиеся с частотой $2\dot{\gamma}$, можно получить угловые скорости рыскания $\dot{\psi}$ и тангажа $\dot{\theta}$. Структурная схема обработки сигналов приведена на рис. 2.

Работа информационно-измерительной системы вращающегося по крену ЛА происходит следующим образом. Определяется угловая скорость крена $\dot{\gamma}$ посредством суммирования сигналов МГ и умножения на постоянную величину $1/2 \sin \epsilon$. С учетом информации о начальном значении угла крена γ_0 вычисляется текущее значение угла крена путем интегрирования угловой скорости $\dot{\gamma}$. Начальное значение угла крена γ_0 может быть получено с помощью акселерометра или маятника. По значению угла крена γ ор-

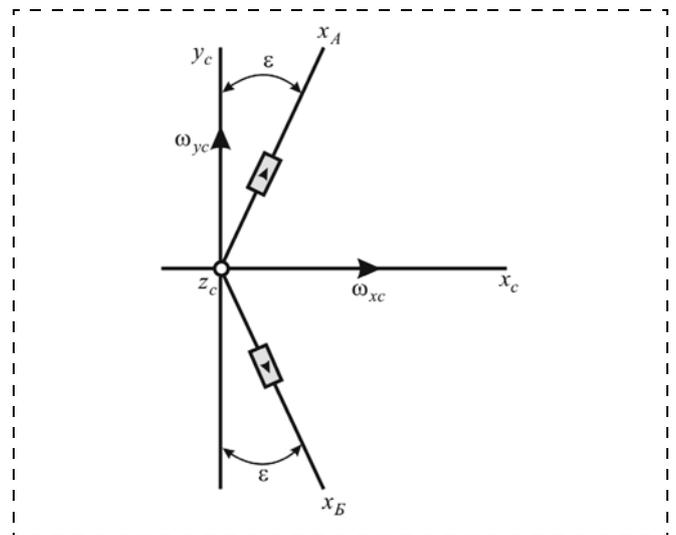


Рис. 1. Схема установки МГ

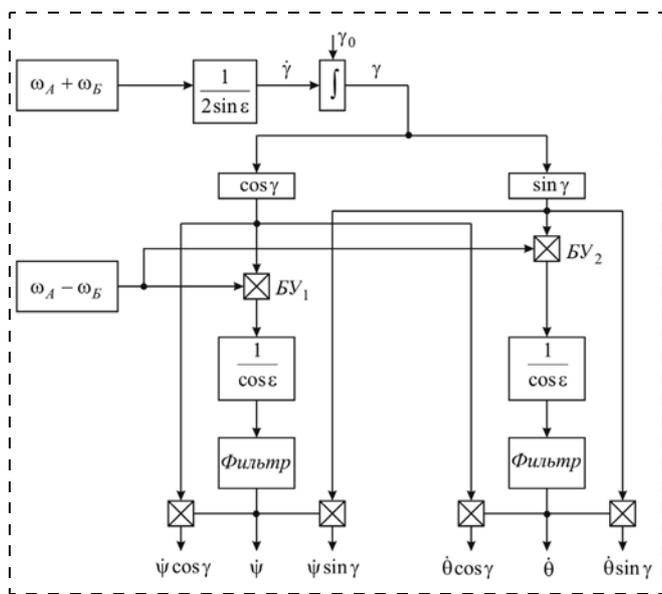


Рис. 2. Структурная схема информационно-управляющей системы вращающегося по крену ЛА

ганизируются тригонометрические функции $\cos \gamma$ и $\sin \gamma$, которые умножаются с помощью блоков умножения $БУ_1$ и $БУ_2$ на разность сигналов гироскопов в соответствии с формулами (1), (2). В соответствии со структурной схемой осуществляются деление образовавшихся сигналов на постоянную величину $1/\cos \epsilon$ и фильтрация составляющих, меняющихся на удвоенной частоте вращения ЛА по крену. Выходами фильтров являются сигналы, пропорциональные угловым скоростям рыскания $\dot{\psi}$ и тангажа $\dot{\theta}$. Умножение последних на функции $\cos \gamma$ и $\sin \gamma$ позволяет выработать сигналы, меняющиеся на частоте вращения крена. Последующее интегрирование угловых скоростей $\dot{\psi}$ и $\dot{\theta}$ (на рис. 2 не показано) позволяет найти углы рыскания и тангажа. Таким образом, с помощью двух гироскопов, расположенных по схеме рис. 1, можно построить систему ориентации вращающегося по крену ЛА. В отличие от классической системы ориентации ЛА, позволяющей найти углы рыскания ψ , тангажа θ и крена γ , для вращающегося по крену ЛА информация об угле крена γ для решения задач ориентации и стабилизации не используется. Как уже упоминалось выше, для управления вращающимся по крену ЛА необходимо найти функции синуса и косинуса угла крена γ для преобразования сигналов управления из опорной системы координат в систему, связанную с ЛА. С этой целью можно миновать предварительное вычисление угла крена γ , и непосредственно получить функции $\cos \gamma$ и $\sin \gamma$. Для этого можно воспользоваться другими параметрами ориентации, такими как направляющие косинусы или параметры Родрига—Гамильтона [1]. В случае использования последних повороту связанной системы координат на угол γ можно поставить в соответствие четыре параметра Родрига—Гамильтона, ненулевыми из которых будут только два:

$$p_0 = \cos \frac{\gamma}{2}, p_1 = \sin \frac{\gamma}{2}.$$

Тогда, решая кинематические уравнения относительно параметров p_0 и p_1 ,

$$\begin{aligned} 2\dot{p}_0 &= -\dot{\gamma}p_1; \\ 2\dot{p}_1 &= \dot{\gamma}p_0, \end{aligned} \quad (3)$$

можно найти тригонометрические функции угла γ

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= 2p_0^2 - 1; \\ \sin \gamma &= 2p_0p_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Структурная схема, соответствующая уравнениям (3) и (4), приведена на рис. 3.

Структурную схему на рис. 3 можно рассматривать как фрагмент схемы информационно-управляющей системы вращающегося по крену ЛА (см. рис. 2).

Таким образом, с помощью двух МГ, специально ориентированных относительно продольной оси, удастся решить задачу определения параметров ориентации вращающегося по крену ЛА.

Исследования работы информационно-измерительной системы ориентации проводились на макетном образце бесплатформенной системы ориентации с косоугольным элементным базисом (рис. 4). Макетный образец состоит из основной платы и трех плат с МГ, ориентация которых относительно

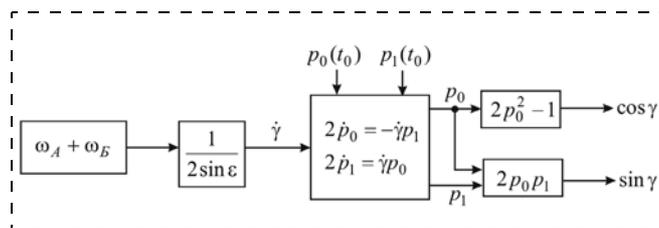


Рис. 3. Структурная схема выработки $\cos \gamma$ и $\sin \gamma$ с помощью параметров Родрига—Гамильтона

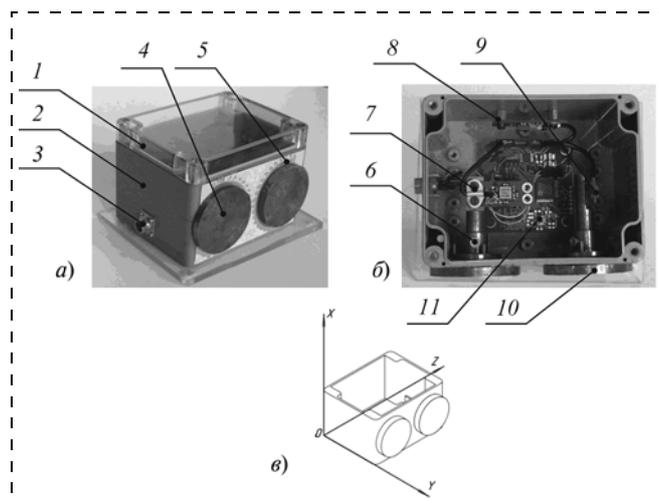


Рис. 4. Модуль бесплатформенной системы ориентации с косоугольным элементным базисом:

a — внешний вид; *б* — вид изнутри; *в* — схема расположения осей связанной системы координат; 1 — крышка; 2 — корпус; 3 — разъем РС-4; 4 — вал; 5 — шкала; 6 — зажимной винт; 7, 8, 9 — платы ДУС; 10 — указатель угла ориентации оси чувствительности датчика; 11 — основная плата

основной платы позволяет реализовать косоугольный измерительный базис.

Плата МГ 8 (рис. 4, б) установлена таким образом, что ось чувствительности совпадает с направлением оси OY связанной системы координат (рис. 4, в). Платы МГ 7, 9 установлены на осях валов 4. Вращением валов можно устанавливать углы между осями чувствительности датчиков и осями OX и OZ в диапазоне от 0 до 90° . Для точности установки на корпусе модуля нанесена шкала с шагом 1° (рис. 4, а). Ноль на шкале соответствует углу 0° между осью чувствительности датчика и осью OZ и углу 90° между осью чувствительности датчика и осью OX . Фиксация установки оси чувствительности датчика осуществляется с помощью зажимных винтов 6 (рис. 4, б).

Для обеспечения предстартовой выставки блока по углам тангажа и крена на основной плате размещен трехосевой МА LIS3L06AL производства компании STMicroelectronics.

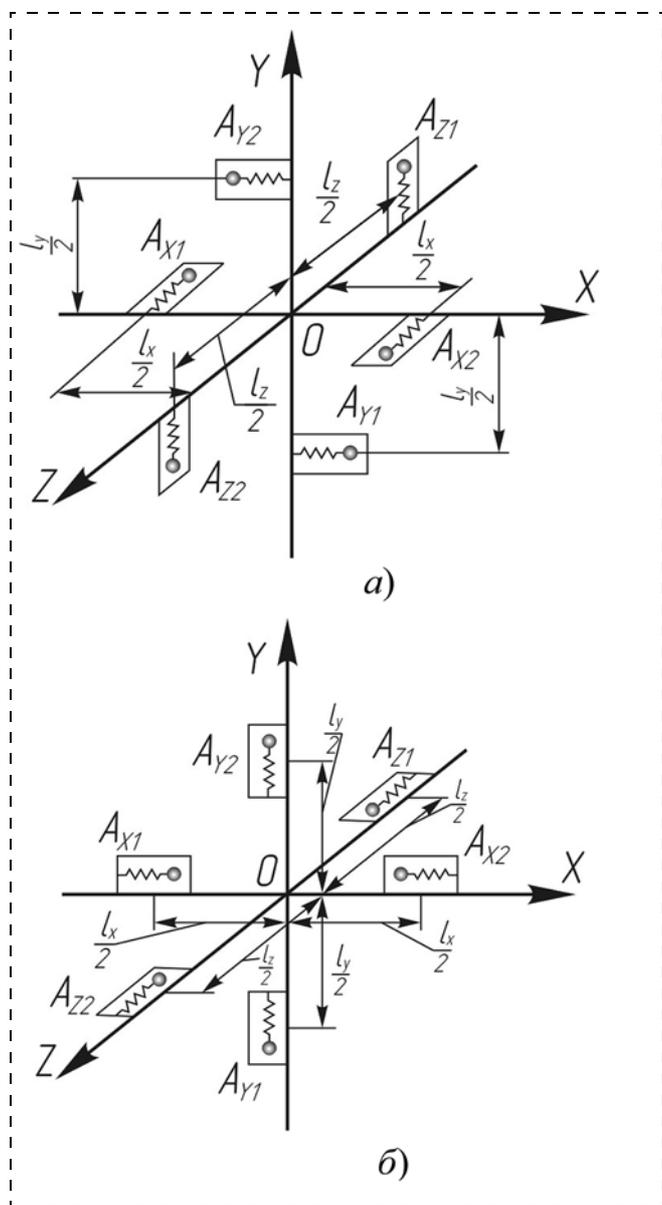


Рис. 5. К расположению акселерометров

Макетный образец бесплатформенной системы ориентации с косоугольным элементарным базисом обеспечивает выработку параметров ориентации: углов рыскания и тангажа, а также тригонометрических функций косинуса и синуса угла крена в соответствии со структурными схемами на рис. 2 и 3.

Анализ экспериментальных результатов показал, что выработка параметров ориентации с использованием косоугольного базиса (см. рис. 3) имеет ряд недостатков, связанных со следующими факторами.

1. Чувствительность МГ к линейным перегрузкам (для современных МГ порядка $1^\circ/\text{c/g}$).

2. Высокие требования к ориентации оси чувствительности МГ (необходимо обеспечивать погрешность выставки оси менее $6''$).

3. Снижение коэффициента передачи МГ по угловой скорости крена $\dot{\gamma}$ в $1/\sin\epsilon$ раз, что приводит к уменьшению отношения сигнал/шум.

Информационно-измерительная система ориентации для вращающихся по крену ЛА на базе акселерометров

Альтернативным способом измерения угловой скорости вращающегося по крену ЛА, лишенным указанных недостатков, является измерение угловой скорости с помощью МА.

Возможны два способа расположения осей чувствительности МА [2]. При первом способе на каждой из осей, связанной с летательным аппаратом системы координат, устанавливают по два акселерометра (рис. 5, а), оси чувствительности которых перпендикулярны соответствующей оси координат. Так, например, оси чувствительности акселерометров A_{x1} и A_{x2} параллельны оси Oz ; A_{y1} и A_{y2} — оси Ox ; A_{z1} и A_{z2} — оси Oy .

Расстояния между акселерометрами, расположенными на одной оси, обозначим l_x , l_y и l_z . Ускорения, измеряемые акселерометрами A_{x1} , A_{y1} , A_{z1} , A_{x2} , A_{y2} , A_{z2} , обозначим соответственно a_{x1} , a_{y1} и т. д.

Рассмотрим два случая ориентации осей чувствительности акселерометров отдельно.

Значения ускорений, измеряемых акселерометрами, установленными по схеме на рис. 5, а, определяются по выражениям

$$\left. \begin{aligned} a_{x1} &= -\dot{V}_z - g_z + \frac{1}{2} l_x \dot{\omega}_y + \Delta a_{x1}; \\ a_{x2} &= \dot{V}_z + g_z + \frac{1}{2} l_x \dot{\omega}_y + \Delta a_{x2}; \\ a_{y1} &= \dot{V}_x + g_x + \frac{1}{2} l_y \dot{\omega}_z + \Delta a_{y1}; \\ a_{y2} &= -\dot{V}_x - g_x + \frac{1}{2} l_y \dot{\omega}_z + \Delta a_{y2}; \\ a_{z1} &= \dot{V}_y + g_y + \frac{1}{2} l_z \dot{\omega}_x + \Delta a_{z1}; \\ a_{z2} &= -\dot{V}_y - g_y + \frac{1}{2} l_z \dot{\omega}_x + \Delta a_{z2}; \end{aligned} \right\}$$

где \dot{V}_x , \dot{V}_y , \dot{V}_z — составляющие абсолютного ускорения центра масс летательного аппарата; g_x , g_y , g_z —

проекция гравитационного ускорения на оси связанной системы координат; $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$ — составляющие углового ускорения системы координат x_{uz} относительно $x_0y_0z_0$; $\Delta a_{x1}, \Delta a_{x2}, \dots, \Delta a_{z2}$ — погрешности акселерометров.

Выражения для суммарных сигналов акселерометров с параллельными осями чувствительности имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \delta a_x &= a_{x1} + a_{x2} = l_x \dot{\omega}_y + \Delta a_x; \\ \delta a_y &= a_{y1} + a_{y2} = l_y \dot{\omega}_z + \Delta a_y; \\ \delta a_z &= a_{z1} + a_{z2} = l_z \dot{\omega}_x + \Delta a_z, \end{aligned} \right\}$$

где $\Delta a_x = \Delta a_{x1} + \Delta a_{x2}$; $\Delta a_y = \Delta a_{y1} + \Delta a_{y2}$; $\Delta a_z = \Delta a_{z1} + \Delta a_{z2}$.

По данным выражениям можно получить угловые ускорения

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_x &= \frac{\delta a_z}{l_z} + \Delta \dot{\omega}_x; \quad \dot{\omega}_y = \\ &= \frac{\delta a_x}{l_x} + \Delta \dot{\omega}_y; \quad \dot{\omega}_z = \frac{\delta a_y}{l_y} + \Delta \dot{\omega}_z, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta \dot{\omega}_x = -\frac{\Delta a_z}{l_z}$; $\Delta \dot{\omega}_y = -\frac{\Delta a_x}{l_x}$; $\Delta \dot{\omega}_z = -\frac{\Delta a_y}{l_y}$ — погрешности измерения угловых ускорений.

Угловые скорости получают из выражений (5) путем однократного интегрирования разностных сигналов акселерометров. Двукратное интегрирование дает угловые координаты.

Второй способ использования акселерометров сводится к тому, что оси чувствительности каждой пары акселерометров совпадают с соответствующей осью координат (рис. 5, б). При этом измеряемые акселерометрами ускорения определяются следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} a_{x1} &= \dot{V}_x + g_x + \frac{1}{2} l_x (\omega_y^2 + \omega_z^2) + \Delta a_{x1}; \\ a_{x2} &= -\dot{V}_x - g_x - \frac{1}{2} l_x (\omega_y^2 + \omega_z^2) + \Delta a_{x2}; \\ a_{y1} &= -\dot{V}_y - g_y + \frac{1}{2} l_y (\omega_x^2 + \omega_z^2) + \Delta a_{y1}; \\ a_{y2} &= \dot{V}_y + g_y - \frac{1}{2} l_y (\omega_x^2 + \omega_z^2) + \Delta a_{y2}; \\ a_{z1} &= \dot{V}_y + g_z + \frac{1}{2} l_z (\omega_x^2 + \omega_y^2) + \Delta a_{z1}; \\ a_{z2} &= -\dot{V}_y - g_z - \frac{1}{2} l_z (\omega_x^2 + \omega_y^2) + \Delta a_{z2}; \end{aligned} \right\}$$

В этом случае суммарные сигналы акселерометров примут вид

$$\left. \begin{aligned} \delta a_x &= a_{x1} + a_{x2} = l_x (\omega_y^2 + \omega_z^2) + \Delta a_x; \\ \delta a_y &= a_{y1} + a_{y2} = l_y (\omega_x^2 + \omega_z^2) + \Delta a_y; \\ \delta a_z &= a_{z1} + a_{z2} = l_z (\omega_x^2 + \omega_y^2) + \Delta a_z, \end{aligned} \right\}$$

и могут быть вычислены проекции угловой скорости на оси связанной системы координат. Например, проекция угловой скорости на ось OX определяется выражением

$$\omega_x = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \left(-\frac{\delta a_x}{l_x} + \frac{\delta a_y}{l_y} + \frac{\delta a_z}{l_z} \right) + f_x},$$

где $f_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta a_x}{l_x} - \frac{\Delta a_y}{l_y} - \frac{\Delta a_z}{l_z} \right)$ — погрешности в измерении.

Так же могут быть получены аналогичные зависимости для проекции угловой скорости на оси OY и OZ .

По измеренным угловым скоростям могут быть вычислены параметры ориентации, так же как и для информационно-измерительной системы ориентации с косоугольным элементарным базисом на базе МГ.

В целях экспериментальной проверки точности функционирования вариантов систем с ориентацией осей чувствительности акселерометров, представленной на рис. 5, был разработан блок чувствительных элементов (рис. 6). Данный блок позволяет измерять угловую скорость вокруг продольной оси вращающегося по крену ЛА.

Блок состоит из пяти микромеханических акселерометров фирмы *Analog Devices*. Двухкомпонентный акселерометр расположен в центре блока, что почти полностью исключает влияние на показания акселерометра угловой скорости ЛА. Две пары однокомпонентных акселерометров расположены на некотором расстоянии от оси вращения ЛА. Ориентация осей чувствительности представлена на рис. 7.

Исследования работы блока чувствительных элементов проводили на стенде, который моделирует вращение летательного аппарата по крену. Частота вращения стенда контролировалась с помощью оптопары. Блок устанавливали на стенде таким образом, чтобы обеспечить его вращение вокруг оси OY .

Результаты исследований показывают, что полезный выходной сигнал блока, пропорциональный угловой скорости, полученный при обработке информации с акселерометров A_{z1} и A_{z2} , различим на фоне

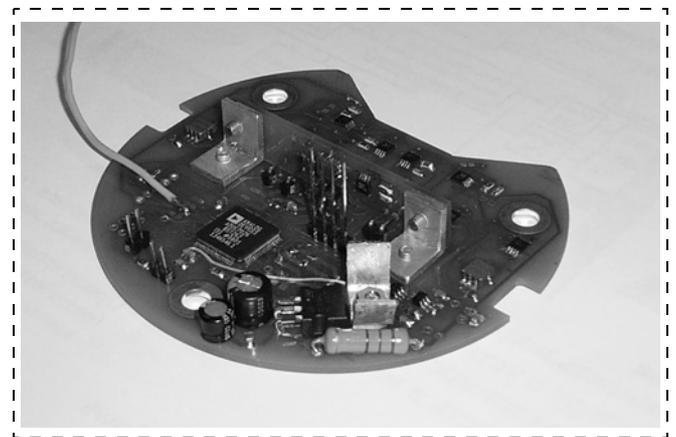


Рис. 6. Блок чувствительных элементов

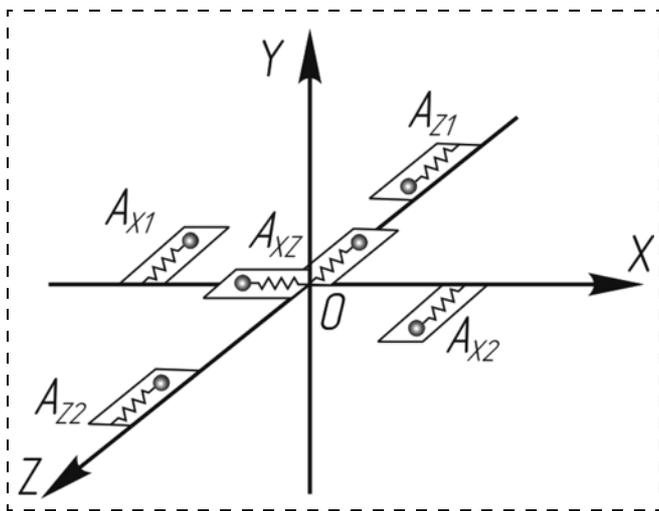


Рис. 7. Ориентация осей чувствительности акселерометров блока

шума только при угловой скорости более $360^\circ/\text{с}$. При этом погрешность измерения не превышает $1,8^\circ/\text{с}$. Однако такая схема не позволяет определять направление вращения ЛА.

Акселерометры A_{x1} , A_{x2} выдают сигнал, отличный от шума, при угловой скорости менее $300^\circ/\text{с}$. Знак сигнала совпадает с направлением вращения.

Однако наличие у микромеханических акселерометров такого параметра, как смещение нулевого сигнала, приводит к погрешности измерения угловой скорости около $10\text{--}15\%$.

Заключение

На основании приведенных результатов можно сделать вывод, что акселерометрическая система на микромеханических акселерометрах должна объединять в своем составе обе схемы расположения осей чувствительности акселерометров, представленные на рис. 5, а, б, и дополнительно в центре вращения измерительного блока необходимо установить микромеханические акселерометры, ориентированные по осям летательного аппарата. При этом акселерометры, установленные по схеме рис. 5, а, должны использоваться в кратковременном режиме (с обязательным обнулением интеграторов) в целях определения направления угловой скорости и коррекции показаний угловой скорости, полученной по акселерометрам, которые установлены по схеме рис. 5, б.

Список литературы

1. Кузовков Н. Т. Системы стабилизации летательных аппаратов (баллистических и зенитных ракет): учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1976. 304 с.
2. Селезнев В. П. Навигационные устройства: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1974. 600 с.

УДК 621.319.43

Е. А. Вopilкин¹, вед. технолог,
Ю. И. Чеченин², нач. лаб.,
Л. Н. Савицкая², зам. нач. лаб.,
Н. Г. Бронникова², нач. лаб.,
В. И. Шашкин¹, д-р физ.-мат. наук, зам. директора,
¹Учреждение Российской академии наук
Институт физики микроструктур РАН, Н.
Новгород
E-mail: vopilkin@ipm.sci-nnov.ru
² ФГУП "Научно-производственное предприятие
"Салют", Н. Новгород

ПЕРЕМЕННЫЙ МЭМС-КОНДЕНСАТОР С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Изготовлена микроэлектромеханическая система (МЭМС) на подложке арсенида галлия, представляющая собой подвижную золотую мембрану толщиной 1,5 мкм размером 100×100 мкм с электростатическим управлением. Исследованы статические электрофизические и резонансные колебательные свойства данной системы. Проведена оценка возможности использования его в качестве емкостного акселерометра, кулоновского двигателя и варактора.

Ключевые слова: МЭМС, варактор, кулоновский двигатель, акселерометр

Введение

Пассивные электронные МЭМС-компоненты (конденсаторы, индуктивности, ключи [1]) широко применяют в радиотехнических системах гражданского и военного назначения. Эти компоненты являются базовыми для создания различных узлов: частотных фильтров, линий задержки, фазовращателей, которые, в свою очередь, входят в состав приемопередающих устройств систем радиолокации, связи и пр. МЭМС-компоненты легко интегрируются с активными компонентами на одном полупроводниковом кристалле, образуя монолитную интегральную схему (МИС) с новыми радиотехническими параметрами.

Задачи дальнейшего развития техники МЭМС/НЭМС (микро/наноэлектромеханических систем) требуют создания микродвигателей (актюаторов) для этих систем. Они необходимы для управления варакторами, для систем обратной связи в туннельных акселерометрах и для создания микропереключателей с высоким качеством коммутации и низким энергопотреблением. На сегодняшний день известны кулоновские [2], биморфные тепловые [3] и пьезоэлектрические [4] микродвигатели. Тепловые двигатели имеют заметную чувствительность к температуре и большие времена реагирования, что ограничивает полосу рабочих частот. Кроме того, они требуют для управления довольно больших токов,

что приводит к большому расходу энергии на поддержание рабочего режима. Пьезоэлектрический двигатель управляется напряжением с небольшими токами утечки и выполнен из достаточно жестких конструктивных элементов, что позволяет ему работать на высоких частотах вплоть до мегагерцового диапазона. Основным недостатком МЭМС-пьезодвигателя является малое значение пьезомодуля материалов, из которых возможно изготовление МЭМС, и, соответственно, малое значение смещения. Кулоновские двигатели управляются напряжением с небольшими токами утечки и развивают достаточно большие смещения. Устройство кулоновского двигателя позволяет использовать его также в качестве варактора. Преимуществами МЭМС-ва-

ракторов являются высокие добротность и линейность при больших мощностях и возможность изготовления их на кремниевых, кварцевых и керамических подложках [5].

Современные МЭМС-компоненты изготавливают с применением методов формирования металлических и диэлектрических слоев на поверхности диэлектрической или полупроводниковой пластины, которые имеют широкое распространение в технологии микроэлектроники, а также с использованием широкопрофильной технологии (*lithographie, galvanoformung, abformung* — LIGA) [6].

В настоящей работе сообщается о разработке технологии МЭМС-структуры переменного конденсатора с электростатическим управлением, выполнен-

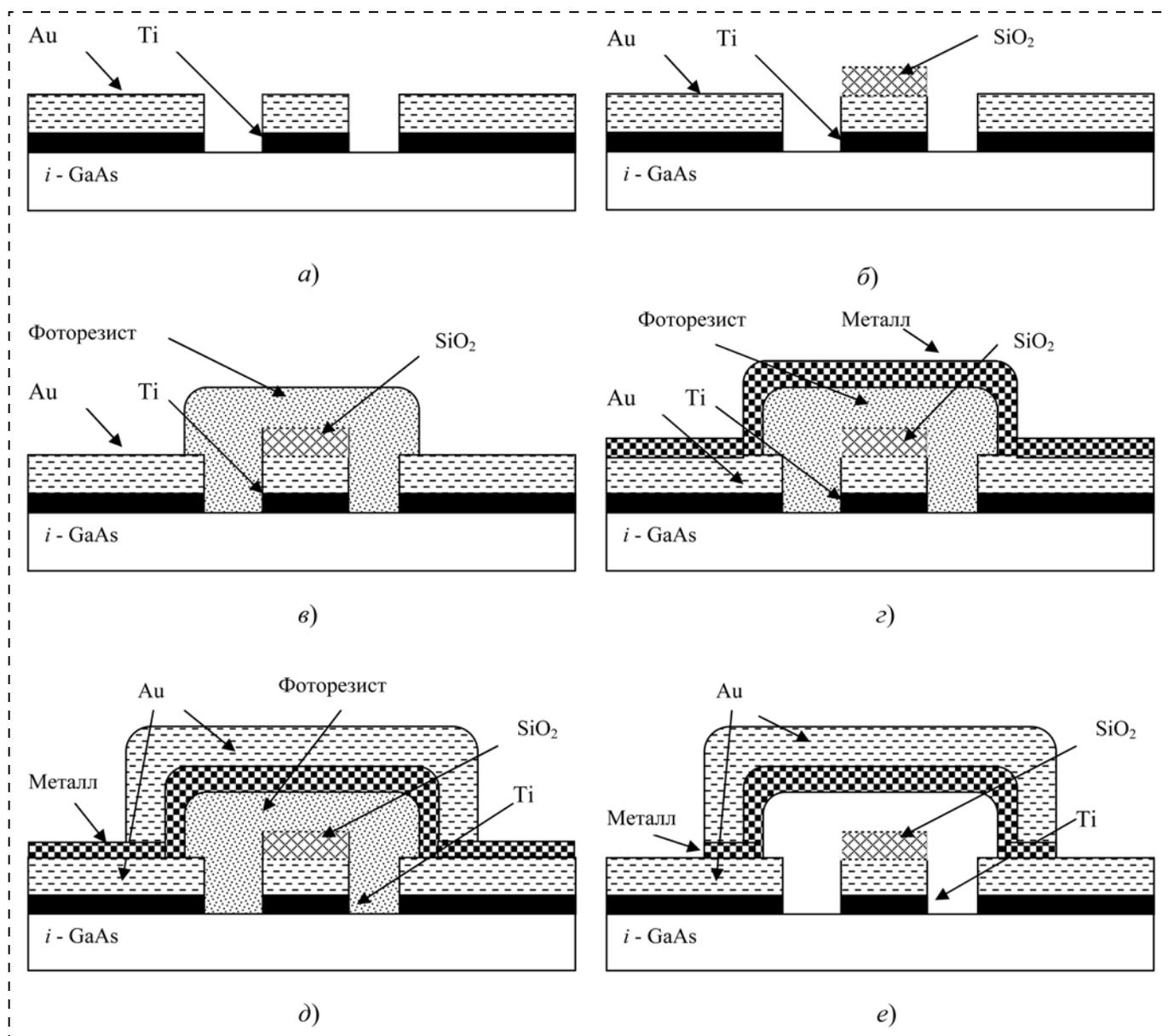


Рис. 1. Последовательность формирования МЭМС-структуры конденсатора:

a — вакуумное напыление и обратная фотолитография элементов копланарного волновода (толщина 0,5 мкм); *б* — осаждения слоя двуокиси кремния из моносилана (толщина 0,4 мкм) и прямая фотолитография; *в* — осаждение слоя фоторезиста толщиной 1,5 мкм; *г* — вакуумное напыление резистивного слоя металла (толщина 0,1 мкм); *д* — гальваническое осаждение слоя золота (толщина 1,5 мкм); *е* — удаление подслоя металла и фоторезиста в плазме; окончательная МЭМС-структура

ного на арсениде галлия для последующей его интеграции в СВЧ МИС. Исследованы геометрические, механические и электрофизические свойства данного устройства. Проведена оценка возможности использования его в качестве емкостного акселерометра, кулоновского двигателя и варактора.

Изготовление МЭМС-структуры

МЭМС была изготовлена на подложке *i*-GaAs. Сначала на ней методом магнетронного напыления и обратной фотолитографии был сформирован нижний электрод в форме копланарного волновода из слоев титана и золота толщиной 0,5 мкм, затем в области под будущим верхним электродом осажден из моносилана диэлектрический слой SiO₂ толщиной 0,4 мкм. Потом был нанесен жертвенный слой фоторезиста (ПММА) толщиной 1,5 мкм. Далее в вакууме был напылен резистивный слой металла толщиной 0,1 мкм, в котором фотолитографическим методом сформирован рисунок верхнего электрода с последующим гальваническим наращиванием слоя золота толщиной 1,5 мкм. После этого слой фоторезиста из-под верхнего электрода был вытравлен в кислородной плазме. Последовательность формирования МЭМС-структуры показана на рис. 1.

Исследование электромеханических свойств МЭМС

На рис. 2 (см. вторую сторону обложки) показано изображение структуры, полученное в оптической измерительной системе (интерферометр белого света)

Talysurf CCI 2000. Линиями на рис. 2 показаны сечения, представленные на рис. 3: вертикальное — на рис. 3, а, и горизонтальное — на рис. 3, б.

Видно, что в результате получена МЭМС, представляющая собой плоский конденсатор с подвижной верхней обкладкой, подвешенной на четырех балках. Зависимость положения верхней обкладки от напряжения между обкладками исследовалась с помощью интерферометра Talysurf CCI 2000 путем снятия профилей (вертикальных по рис. 2) при напряжениях до 20 В. На рис. 4 (см. вторую сторону обложки) показаны профили верхней пластины при различных напряжениях. Также была измерена *CV*-характеристика этого варактора на установке Keithley mod. 590 CV-Analyzer. *CV*-характеристики при изменении напряжения от 0 до 20 В и обратно для обеих полярностей представлены на рис. 5. Видно, что эти характеристики симметричны для разных полярностей напряжения и имеют гистерезис. Это свидетельствует о наличии обратимого залипания верхнего электрода, по-видимому, за счет сил Ван-дер-Ваальса.

Зависимость смещения верхней обкладки от напряжения и *CV*-характеристика приведены на рис. 6. В качестве точки измерения положения верхней обкладки выбрана верхняя точка, показанная стрелкой на рис. 4. Видно, что верхняя обкладка имеет три стабильных положения — верхнее, среднее и нижнее. Верхнее стабильное положение (группа профилей 1 на рис. 4) соответствует нулевому напряжению, при котором пластина верхней обкладки выгнута вверх. Второе стабильное положение (группа

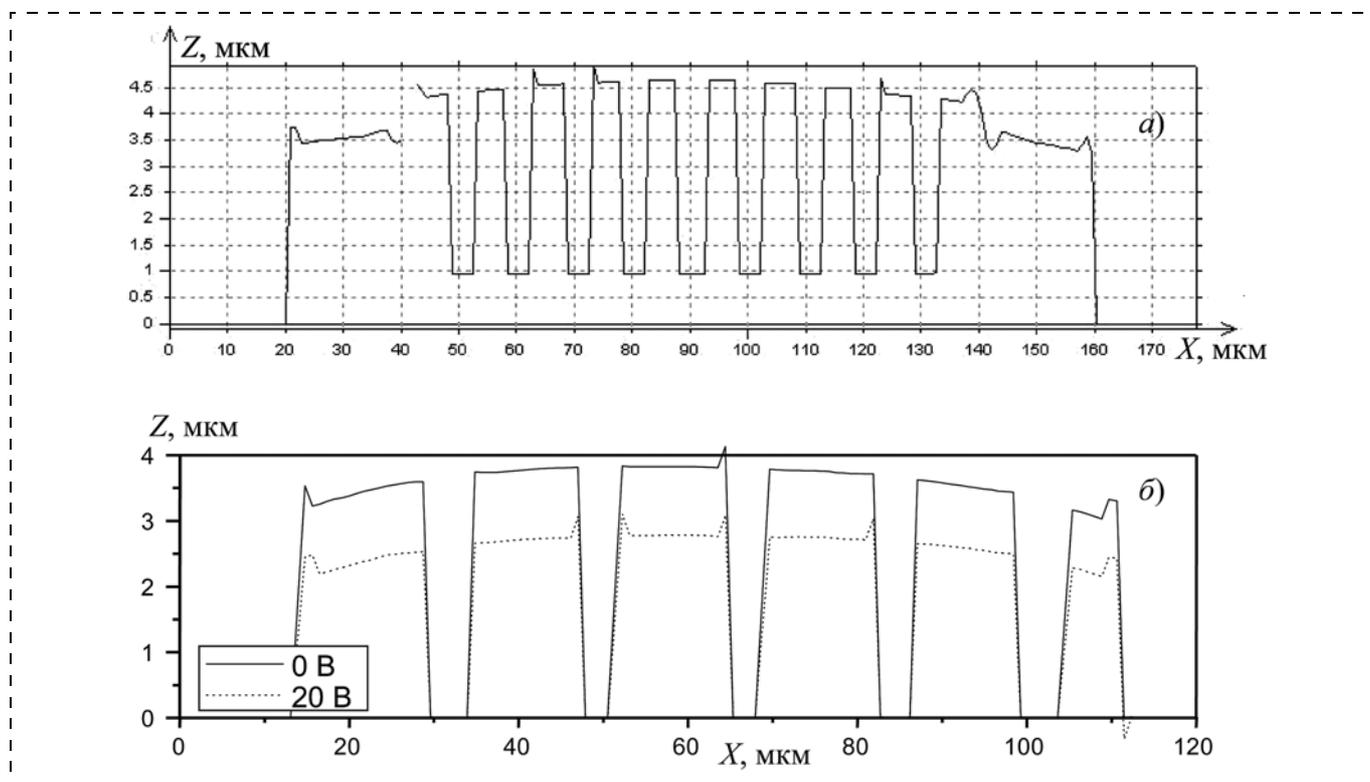


Рис. 3. Сечения, показанные на рис. 2 линиями: а — вертикальное; б — горизонтальное при напряжениях 0 и 20 В

профилей 2 на рис. 4) соответствует напряжению около 10,5 В, при котором пластина выгнута вниз. Третье стабильное положение (группа профилей 3 на рис. 4) соответствует напряжениям более 15 В, при которых пластина лежит на диэлектрике. Из рис. 6 видно, что при переходе от одного стабильного положения к другому высота измеряемой точки и

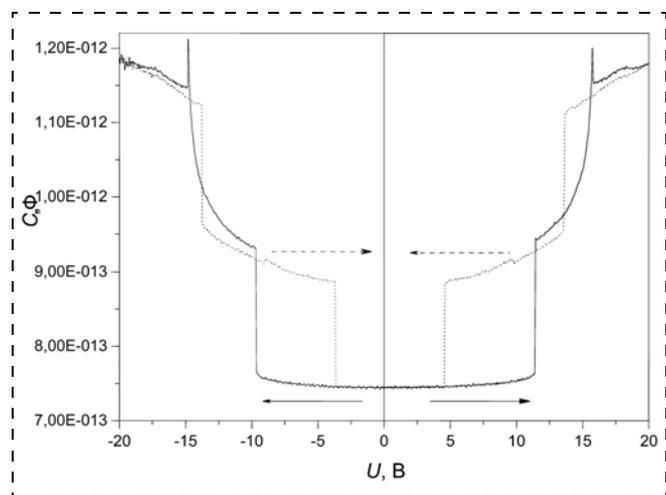


Рис. 5. CV -характеристики при напряжениях от -20 до 20 В

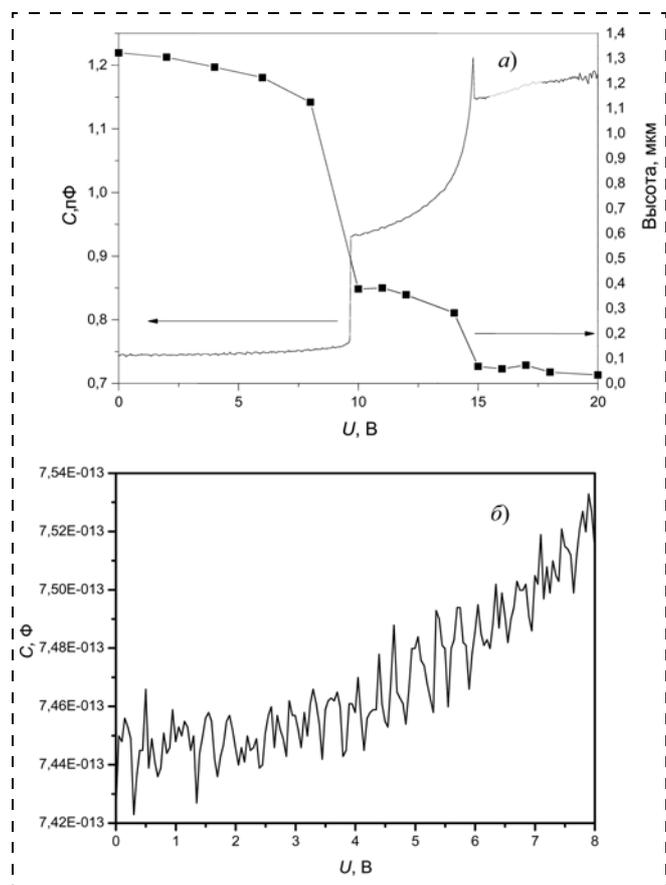


Рис. 6. Зависимость смещения верхней обкладки от напряжения и CV -характеристика (а); начальный участок CV -характеристики (б)

емкость меняются скачкообразно. При этом емкость конденсатора перестраивается в 1,6 раза: с 0,744 пФ при нулевом напряжении до 1,19 пФ при 20 В. Смещение верхней обкладки до касания диэлектрического слоя составляет 1,4 мкм, что совпадает с толщиной зазора между верхней обкладкой и диэлектриком.

Собственная частота низшей моды механических колебаний верхней обкладки измерялась также с помощью интерферометра Talysurf CCI 2000. Регистрация одного кадра системы включает пошаговое перемещение объектива и обработку полного набора изображений. По времени она занимает около 1 мин, что много больше периода колебаний верхней обкладки. Для поиска частоты резонансного раскачивания колебаний верхней обкладки использовали тот факт, что амплитуда качаний в резонансе становится столь большой, что размываются интерференционные полосы на изображении верхней обкладки при неподвижном объективе — в режиме интерференционного микроскопа. Методом наклона устанавливалось положение образца, при котором на верхней обкладке наблюдались интерференционные полосы (рис. 7, а). На электроды подавалось переменное напряжение с генератора амплитудой в 1 В и проводилось сканирование по частоте, которая измерялась частотомером. При совпадении частоты генератора с собственной частотой низшей моды колебаний наблюдаемая картина менялась: исчезали полосы на верхней обкладке (рис. 7, б). Резонансная частота, измеренная таким образом в воздухе, составила 18 кГц. Данный метод не позволяет точно измерить механическую добротность системы, давая возможность лишь грубо оценить ее по ширине резонанса. Такая оценка дает $Q \approx 10$. Как показывают результаты работы [7], более точные измерения добротности без вакуумирования системы не добавляют информации о свойствах самой системы, так как измеренная на воздухе добротность определяется не ее качеством, а вязким трением о воздух.

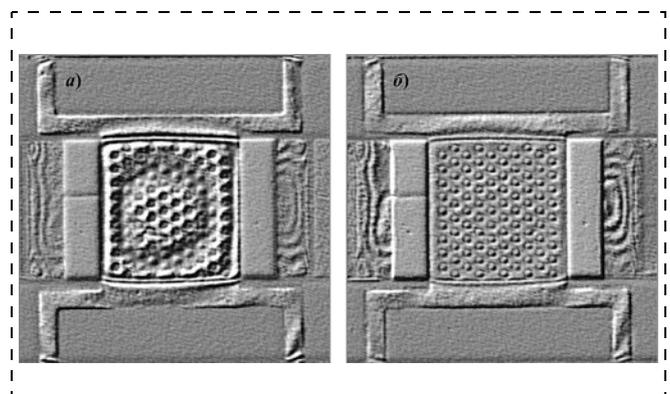


Рис. 7. Фотография структуры в интерферометре Talysurf CCI 2000 в режиме интерференционного микроскопа при подаче переменного напряжения на электроды:

а — вне резонанса — на верхнем электроде видны интерференционные кольца, б — в резонансе — $f = 18$ кГц — интерференция на верхнем электроде подавлена

Оценка для емкостного акселерометра

Оценим чувствительность данной системы к ускорению на низких частотах при использовании ее в качестве емкостного акселерометра. В общем случае акселерометр представляет собой механическую колебательную систему, оснащенную датчиком смещения. Представим ее как пружинный маятник с инерционной массой m , подвешенной на пружине жесткостью k . Датчиком смещения в нашем случае является сам конденсатор. Собственная частота такой системы определяется формулой

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{k/m}.$$

Смещение верхней обкладки детектируется путем измерения емкости конденсатора.

При малых смещениях верхней обкладки с помощью установки Keithley mod.590 CV-Analyzer можно уверенно обнаружить изменение емкости, соответствующее напряжению 6 В на CV-характеристике (см. рис. 6, б), что соответствует смещению верхней обкладки на 120 нм. При воздействии низкочастотного ускорения a на инерционную массу m ее смещение x определяется условием равновесия $ma = kx$,

$$a = \frac{k}{m} x = \omega_0^2 x = 4\pi^2 f_0^2 x.$$

Подставляя в эту формулу измеренное значение собственной частоты $f_0 = 18$ кГц и минимально измеримое смещение $x = 120$ нм, получим минимально измеримое ускорение $a = 156,6$ г на частотах много ниже резонансной. Это неудовлетворительная разрешающая способность, не позволяющая использовать данное устройство как емкостной акселерометр на постоянном ускорении. Для повышения чувствительности целесообразно использовать этот датчик на частоте механического резонанса, где его смещение возрастет в Q раз. Для получения высокой механической добротности датчик должен быть вакуумирован. Добротность его на воздухе не превышает 10 и определяется трением о воздух, в то время как в вакууме можно ожидать добротности в 1000 и более. При этом измерительный конденсатор должен быть включен в LC контур с собственной частотой много больше 18 кГц. Удобными являются частоты в несколько мегагерц. Тогда при воздействии на МЭМС-конденсатор ускорения на частоте 18 кГц его емкость, а соответственно, и резонансная частота LC контура будут

меняться с этой частотой, и по изменению резонансной частоты LC контура можно будет определить ускорение с высокой точностью.

Заключение

Изготовлена микроэлектромеханическая система на подложке арсенида галлия, представляющая собой подвижную золотую мембрану с электростатическим управлением.

Использование данной системы в качестве емкостного акселерометра на низких частотах нецелесообразно ввиду низкой чувствительности. Данная система может быть использована как МЭМС-варактор или как кулоновский двигатель для акселерометра. При этом может быть использована токовая система регистрации ускорения. В вакууме вблизи резонанса возможно использование емкостного способа регистрации. Систему можно также применять в качестве логического элемента, так как она имеет два устойчивых состояния, не чувствительных к шумам.

При формировании данной МЭМС-структуры конденсатора не были использованы какие-либо специально разработанные технологические операции, что позволяет изготавливать СВЧ МИС на GaAs с МЭМС-структурами и традиционными конструкциями элементов в едином технологическом цикле.

Авторы выражают благодарность Ю. Н. Дроздову за помощь в написании статьи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-02-97022 p_поволжье_a.

Список литературы

1. Rebeiz G. M., Entesari K., Reines et al. Tuning in to RF MEMS // IEEE Micros. Mag. 2009. N 10. P. 55–72.
2. Lui C. H., Barzilai A. M., Reynolds J. K. et al. Characterization of high-sensitivity micromachined tunneling accelerometer with micro-g resolution // Journal of Microelectromechanical Systems. 1998. N 7. P. 235.
3. Шашкин В. И., Вопилкин Е. А., Востоков Н. В. и др. Изготовление микроконсоль и управление их изгибом // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 22–26.
4. Вопилкин Е. А., Шашкин В. И., Дроздов Ю. Н. и др. Анизотропный пьезоэффект в микроэлектромеханических системах на основе эпитаксиальных гетероструктур $Al_{0,5}Ga_{0,5}As/AlAs$ // ЖТФ. 2005. Т. 79, вып. 10. С. 75–79.
5. Rebeiz G. M. RF MEMS Theory, Design and Technology. Hoboken NJ: Wiley, 2003.
6. Вардан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение // ТЕХНОСФЕРА, 2004. 528 с.
7. Abadal G., Davis Z. J., Helbo B. et al. Electromechanical model of a resonating nano-cantilever-based sensor for high-resolution and high-sensitivity mass detection // Nanotechnology. 2001. Vol. 12. P. 100–104.

С. Г. Новиков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Н. Т. Гурин, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф.,
И. В. Корнеев, аспирант, e-mail: korneeviv@gmail.com,
В. А. Родионов, аспирант,
 ГОУ ВПО Ульяновский государственный
 университет

ДВУХПОЛЮСНЫЙ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ФОТОДАТЧИК С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

Рассмотрен двухполюсный позиционно-чувствительный фотодатчик с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП). Фотодатчик представляет собой аналоговый комбинированный прибор, реализованный на основе биполярно-полевого элемента с ОДП и полупроводникового позиционно-чувствительного фотоприемника. Особенностью фотодатчика является появление участка ОДП на выходной вольт-амперной характеристике в двухэлектродном включении при освещении fotocувствительной области и зависимость значения ОДП от координаты центра светового пучка на поверхности фотодатчика. Рассмотренный двухполюсный позиционно-чувствительный фотодатчик с ОДП может найти применение в различных узлах мехатроники, микросистемной техники, автоматики, устройствах управления и позиционирования.

Ключевые слова: позиционно-чувствительный фотодатчик, прибор с отрицательной дифференциальной проводимостью

Создание новой элементной и компонентной базы современной электроники является актуальной задачей в технике и технологии полупроводниковых приборов. Одним из перспективных методов решения этой задачи может стать направление, связанное с разработкой новых и расширением функциональных возможностей известных полупроводниковых приборов с внутренней положительной обратной связью. Придание новых свойств таким приборам, например позиционной fotocувствительности, значительно расширяет области их применения [1]. В частности, такие полупроводниковые позиционно-чувствительные N -фотоприемники с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) способны найти широкое применение в различных узлах автоматики, устройствах управления и позиционирования, а также в системах распознавания образов [2]. Использование новых типов функциональных позиционно-чувствительных фотодатчиков на основе приборов с участком ОДП на вольт-амперной характеристике позволяет значительно упростить схемотехнические решения, повысить эффективность, качество и надежность электронных узлов и систем.

В настоящее время предложены интегральные фотоприемники с ОДП на основе многослойных по-

лупроводниковых структур, в которых проявляется позиционная чувствительность и наблюдается изменение значения ОДП при смене пространственного положения светового пучка [1, 4]. Такие фотоприемники представляют собой реализацию в объеме полупроводникового материала схемы замещения прибора с отрицательной дифференциальной проводимостью на базе двух биполярных транзисторов. Недостатками таких приборов является необходимость дополнительного гальванического управления для получения участка отрицательной дифференциальной проводимости (трехэлектродные приборы) и малая, несколько миллиметров, область fotocувствительности, в пределах которой в зависимости от координаты изменяются основные электрические параметры фотоприемника. При расширении этой области снижается чувствительность транзисторов к оптическому воздействию, что приводит к исчезновению зависимости значения ОДП от координаты центра светового пучка на поверхности фотоприемника.

Для создания двухэлектродных позиционно-чувствительных приборов с ОДП, управляемых только посредством оптического воздействия, и для расширения области их позиционной fotocувствительности возможно объединение либо схемотехнически, либо интегрально в одном объеме полупроводника приборов, обладающих позиционной fotocувствительностью, и приборов с ОДП.

В данной работе рассмотрен комбинированный полупроводниковый позиционно-чувствительный фотодатчик с ОДП (рис. 1), реализованный на основе прибора с отрицательной дифференциальной проводимостью (N), который может быть выполнен твердотельным или в виде схемотехнического аналога, и позиционно-чувствительного фотоприемника — ПЧФ [3].

ПЧФ представляет собой $p-n-p$ -структуру с тремя омическими контактами, два из которых расположены по краям верхнего fotocувствительного слоя, служащего эмиттером и одновременно делителем напряжения источника. Третий является контактом к эквипотенциальной нижней области полупроводника, служащей коллектором. При проецировании светового пучка на эмиттерную область ПЧФ создается рельеф возбужденных светом и разделенных $p-n$ -переходом носителей тока. Считывание рельефа осуществляется либо приложением пилообразного напряжения между эмиттером и коллектором (режим сканистора) [3], либо постоянным напряжением, приложенным между эмиттерами (режим фотопотенциометра).

ПЧФ включен в цепь управления элемента с отрицательной дифференциальной проводимостью таким образом, что первый контакт (1) к fotocувствительной области полупроводникового ПЧФ соединен с эмиттерным (Э) электродом прибора с ОДП, второй контакт (2) к fotocувствительной области соединен с коллекторным электродом (К), а третий контакт (3) полупроводникового ПЧФ соединен с базовым электродом (Б) прибора с ОДП. Э₁ и Э₂ — электроды двухполюсного позиционно-чувствительного фотоприемника с отрицательной проводимостью; Φ — световой пучок, падающий на по-

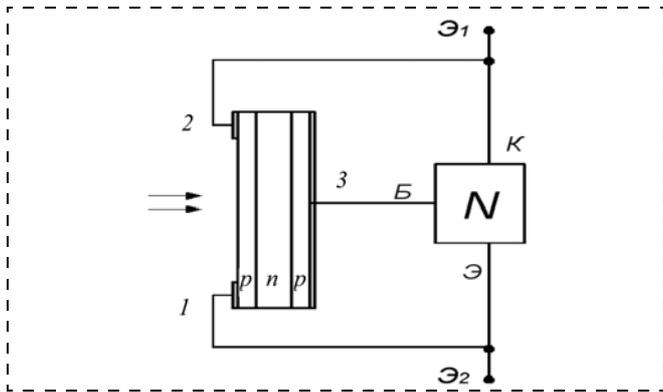


Рис. 1. Структурная схема двухполюсного позиционно-чувствительного фотодатчика с ОДП

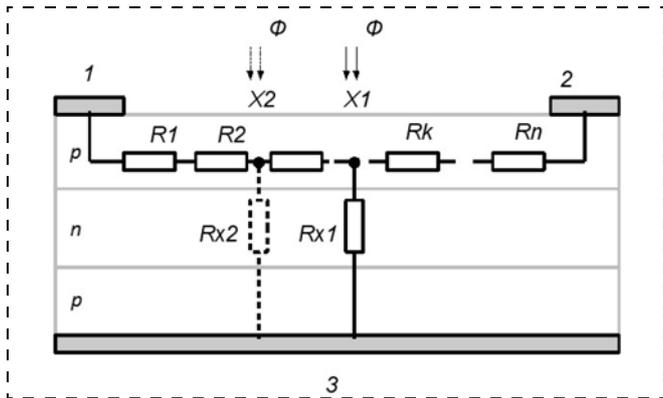


Рис. 2. Схема замещения ПЧФ в режиме фотопотенциометра

верхность ПЧФ. За счет рассматриваемой схемы соединения реализуется двухполюсный комбинированный позиционно-чувствительный фотодатчик, имеющий вольт-амперную характеристику (ВАХ), содержащую участок отрицательной проводимости.

Получение участка ОДП на выходной вольт-амперной характеристике такого фотодатчика в двухэлектродном включении обеспечивается за счет использования ПЧФ в режиме фотоуправляемого делителя напряжения — фотопотенциометра.

Особенностью работы ПЧФ в режиме фотопотенциометра является линейная зависимость напряжения на третьем электроде (коллекторе) от координаты светового пучка на поверхности фотодатчика. При этом значение напряжения па этом электроде при нахождении центра светового пучка в координате x можно описать следующим аналитическим выражением:

$$U_x = kE_0x/L,$$

где E_0 — постоянное напряжение, прикладываемое между первым и вторым электродами ПЧФ; L — длина фоточувствительного слоя; x — координата центра светового пучка па поверхности ПЧФ; k — конструктивный параметр, зависящий от геометрии ПЧФ и интенсивности излучения.

ПЧФ в режиме фотоуправляемого делителя работает следующим образом. При приложении внешнего напряжения между первым и вторым электродами ПЧФ все падение напряжения осуществляется на фоточувствительном p -слое. Между электродами 1 и 3,

2 и 3 внешнее напряжение не прикладывается, и оба p — n -перехода ПЧФ при освещении его поверхности работают в фотогальваническом режиме.

В отсутствие освещения поверхности сопротивление двух последовательно включенных p — n -переходов ПЧФ велико. При высокоинтенсивном освещении небольшого участка поверхности в ограниченном объеме полупроводника реализуется генерация электронно-дырочных пар, и большой градиент концентрации освобожденных светом избыточных пар носителей заряда обуславливает их диффузионное перемещение к контактным p — n -переходам. В области контактных переходов происходит разделение пар полем перехода. Нарушается равновесие системы, возникает фототок и сопротивление p — n -переходов ПЧФ уменьшается по логарифмическому закону с ростом интенсивности светового потока. Таким образом, при освещении участка поверхности ПЧФ последовательная цепочка p — n -переходов в объеме, ограниченном диаметром светового пучка и толщиной структуры ПЧФ, представляет собой сопротивление, значение которого зависит от интенсивности светового потока.

В упрощенной эквивалентной схеме ПЧФ в режиме фотопотенциометра (рис. 2) напряжение на электроде 3 равно нулю в отсутствие освещения (сопротивление цепочки велико и эквивалентно разрыву цепи) и пропорционально координате светового пучка x на поверхности ПЧФ при освещении, когда сопротивление цепочки p — n -переходов мало. Полученное таким образом напряжение на электроде 3 ПЧФ используется для управления трехэлектродным прибором с ОДП.

В отсутствие освещения поверхности ПЧФ (см. рис. 1) (при отсутствии управляющего напряжения на базовом электроде прибора с ОДП (N)) на его выходной вольт-амперной характеристике участка ОДП не наблюдается. Появление и движение пучка света по поверхности ПЧФ (рис. 2, координаты x_1 и x_2) обеспечивает изменение падения напряжения на базовом электроде и, как следствие, появление на выходной вольт-амперной характеристике фотоприемника участка ОДП и изменение ее параметров (рис. 3).

Увеличение протяженности области позиционной фоточувствительности по сравнению с существующими позиционно-чувствительными фотоприемниками с отрицательной дифференциальной проводимостью достигается за счет использования

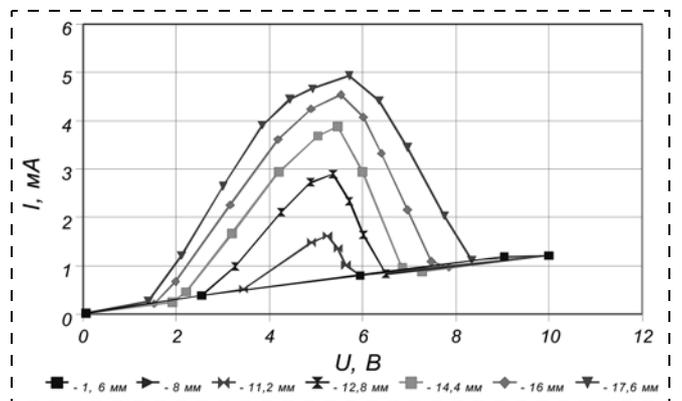


Рис. 3. Семейство выходных вольт-амперных характеристик в зависимости от координаты светового пучка при токе ПЧ-диода 250 мА

ПЧФ, линейные размеры фоточувствительной области которого могут изменяться от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров.

В экспериментальных образцах двухполюсного позиционно-чувствительного фотодатчика с отрицательной дифференциальной проводимостью элемент с ОДП (N) реализован на основе комбинации двух транзисторов, соединенных по схеме модуляции тока базы основного транзистора дополнительным полевым транзистором с управляющим $p-n$ -переходом [5]. При этом затвор полевого транзистора соединен с коллектором биполярного транзистора. В качестве биполярного транзистора использован бескорпусной транзистор типа КГ 3129, в качестве полевого — бескорпусной транзистор типа КП 302.

ПЧФ представляет собой линейную полупроводниковую структуру с габаритными размерами 2×35 мм, с двумя $p-n$ -переходами, реализованными на глубинах 50 и 200 мкм в объеме полупроводника p -типа проводимости с поверхностным сопротивлением 10^5 Ом/см. Удельное сопротивление n -областей составляет 250 Ом/см. На верхней фоточувствительной поверхности полупроводникового ПЧФ размещены два металлических электрода (по краям линейной структуры) для подключения источника питания, на противоположной стороне кристалла расположен третий выходной электрод.

Все элементы комбинированного прибора смонтированы в одном корпусе с прозрачным окном для ввода излучения. Габаритные размеры фотоприемника составляют $42 \times 11 \times 5$ мм. В качестве источника излучения использован полупроводниковый лазерный ПК-диод со средней мощностью 300 мВт и сфокусированным пучком на поверхности ПЧФ диаметром 1 мм.

Такой комбинированный прибор при наличии светового пучка на фоточувствительной поверхности ПЧФ имеет выходные N -образные вольт-амперные характеристики (см. рис. 3). Значение тока пика N -характеристики фотодатчика зависит от пространственного расположения светового пучка на поверхности ПЧФ. Полученная в эксперименте зависимость значения тока пика от координаты светового пучка комбинированного позиционно-чувствительного N -прибора представлена на рис. 4. При значениях ниже 10 мм ВАХ утрачивает участок отрицательной дифференциальной проводимости, что связано со снижением напряжения на выходе ПЧФ

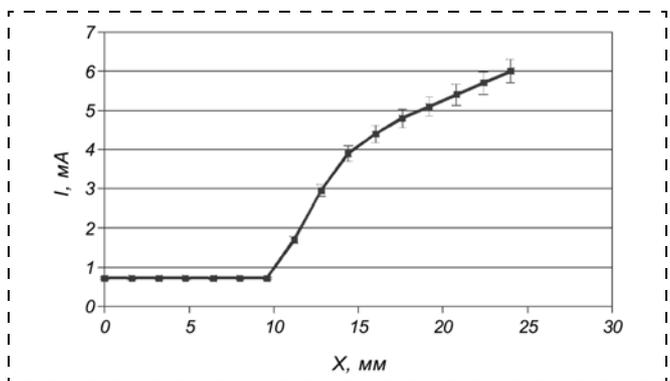


Рис. 4. Зависимость тока пика ПЧФ от координаты светового пучка

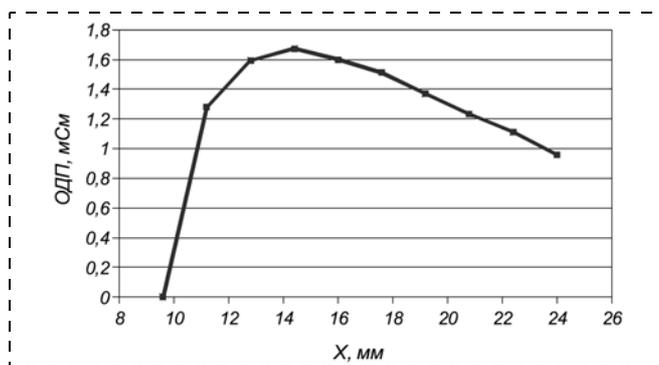


Рис. 5. Зависимость значения ОДП позиционно-чувствительного фотодатчика от координаты светового пучка

ниже порога чувствительности прибора с ОДП, при значениях свыше 25 мм происходило исчезновение участка ОДП вследствие смещения напряжения минимума в область пробоя биполярного транзистора.

С учетом погрешности измерений в диапазоне от 14 до 24 мм полученная характеристика носит линейный характер, что предполагает выполнение с помощью рассмотренного прибора простых преобразований координаты в ток, и обеспечивает применение таких преобразователей в устройствах управления различными сложными механизмами.

На рис. 5 приведена экспериментальная зависимость ОДП такого фотодатчика от координаты светового пучка. Зависимость носит экстремальный характер. По максимуму значения ОДП можно, например, проводить калибровку системы обработки сигналов датчика либо определять собственную частоту колебаний при использовании такого датчика в качестве активного элемента координатно-управляемых генераторов сигналов. Из графика видно, что на достаточно большом координатном отрезке в пределах погрешности зависимость линейна и наблюдается небольшое изменение значения ОДП, и лишь в области значений координаты менее 10 мм участок ОДП исчезает.

Рассмотренная комбинация позиционного фотодатчика и элемента с ОДП позволяет реализовывать в дальнейшем как схемотехнические аналоги, так и твердотельные интегральные позиционно-чувствительные полупроводниковые N -приборы для применения в различных областях автоматики, электроники и микросистемной техники.

Работа поддержана грантами ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009—2013 годы, контракты П1158 и П2142.

Список литературы

1. **Фотоприемник** с отрицательной проводимостью на основе полупроводниковой структуры: пат. РФ № 2309487. 2007.
2. **Виглеб Г.** Датчики. Устройство и применение. М.: Мир, 1989.
3. **Золотарев В. Ф.** Безвакуумные аналоги телевизионных трубок. М.: Энергия, 1972. 216 с.
4. **Каштанкин И. А., Гурин Н. Т.** Фоточувствительный кремневый биполярный N -прибор с управляемой вольт-амперной характеристикой // Письма в ЖТФ. 2005. Том. 31, вып. 13. С. 46—49.
5. **IEEE.** Transactions on Circuits and Systems. 1985, № 1. P. 46—61.

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ. АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Хорошо известно, что прирост энергетических ресурсов (наряду со стабилизацией использования нефти и природного газа) будет обеспечиваться не только за счет дальнейшего роста атомной энергетики и развития эффективных методов переработки каменного угля в жидкое и газообразное топливо, но и за счет вовлечения в энергетический баланс **альтернативных** источников энергии (энергии солнца, ветра, земных недр, морских волн и т. д.).

В приводимых ниже статьях студентов факультетов автоматики и электроники и управления и экономики высоких технологий Национального исследовательского ядерного университета МИФИ приводятся первые результаты их исследований как раз по солнечной энергетике.

Работа К. Г. Овакимяна и С. В. Андриянова открывает новую проблему эффективного использования солнечных преобразователей, установленных на заоблачных платформах. Студенты сами дали этой программе наименование проект "Gelios".

В Обзоре Ершовой Евгении, Овакимяна Карена и Григорьева Дениса, прошедших кратковременную стажировку в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, кратко обобщаются лучшие в России результаты по высокоэффективному преобразованию энергии солнца твердотельными гетероэпитаксиальными полупроводниковыми элементами. КПД таких батарей стабильно превышает 35 %, и видны пути его повышения.

Альтернативными твердотельным выступают гибкие солнечные батареи, попытки повышения КПД которых активно исследуются в Минске (БГУИР, БГУ). Авторы второго приводимого ниже студенческого обзора (Ершова Евгения, Овакимян Карен, они поработали в лабораториях БГУИР) показывают, что достичь мирового уровня по КПД (8...10 %) можно за счет использования современного кластерного оборудования. Гибкие батареи на основе органических полупроводников по стоимости выгоднее твердотельных, и их использование в аэростатной энергетике России может оказаться весьма эффективным.

Статья Григорьева Дениса носит экономический характер. В ней показаны ключевые игроки рынка солнечных преобразователей, а также дан прогноз на изменение цены энергии, получаемой от солнца.

Все "заявочные" статьи являются поисковыми. Основное же внимание на кафедре микро- и нанoeлектроники НИЯУ МИФИ уделяется организации промышленного производства кремниевых батарей. Проводимая совместно со специалистами Индии и Германии работа четко свидетельствует о том, что солнечная энергетика и нанотехнологии неразрывно связаны. Поэтому мы часто говорим: "Солнечная энергетика и нанoeлектроника — синонимы".

Патрикеев Л. Н., канд. техн. наук, проф.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

К. Г. Овакимян, студент, e-mail: s-deimos@mail.ru,
С. В. Андриянов, студент,
 e-mail: akademik1989@mail.ru,
 Национальный исследовательский ядерный
 университет МИФИ

АЭРОСТАТНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Перечислены технологические и экономические перспективы потенциального высокоэффективного элемента альтернативной энергетики. Новый элемент основан на концепции аэростатных солнечных энергетических систем. Описаны возможные решения новой концепции для основных проблем современной солнечной энергетики.

Ключевые слова: солнечная энергетика, аэростатные платформы, проект "Gelios", АЭС, наноматериалы

Как показывают исследования, проводимые многими организациями, мировые энергетические потребности к 2030 г. увеличатся на 40 % [1]. Главным решением проблемы удовлетворения растущих потребностей сейчас считается, помимо увеличения объемов классической энергетики, также внедрение альтернативных технологий: ветряных, солнечных, геотермальных и биотопливных. У каждой из них есть свои достоинства и недостатки. Но все же из перечисленного стоит выделить солнечную энергетику. Главным достоинством этой технологии можно считать наличие самого большого, самого яркого и мощного реактора в нашей планетарной системе — Солнца. Всего за минуту в виде солнечного излучения на Землю попадает больше энергии, чем вырабатывается всеми генерационными мощностями мира за год.

Согласно обзору рынка компании Research.Techart [2] общая мощность фотоэлементов, выпускаемых в мире в 2008 г., достигла 5,07 ГВт, что сравнимо с ежегодным введением в строй атомных реакторов. Только за последние 10 лет суммарная мощность введенных солнечных электростанций выросла более чем двадцатикратно. Стоит также отметить прогноз Европейской ассоциации фотовольтаики (EPIA) [3], по которому к 2030 г. солнечные батареи будут производить до 180 ГВт, а годовой объем рынка фотовольтаики достигнет 1,5 трлн евро. По утверждениям многих ученых и представителей бизнеса, именно энергия Солнца из экзотической альтернативы через несколько десятилетий превратится в одну из доминант мировой энергетики. И все же, несмотря на всю перспективность и внушительные темпы роста, у солнечной энергетики есть ряд проблем, которые заметны уже сейчас и со временем будут становиться все острее. Известны несколько основных технических проблем солнечной энергетики:

- зависимость мощностных показателей солнечных электростанций от погоды и географического положения, что "закрывает" для солнечной энергетики огромные территории, а значит, огромные рынки;
- неспособность солнечных электростанций работать в темное время суток;
- необходимость выделения обширных земельных площадей под строительство электростанций большой мощности;
- высокая стоимость солнечных панелей.

Идея аэростатных электростанций возникла в России несколько лет назад [4], мы считаем, что настало время начать работы по программе "Gelios", предлагающей революционные инновации в технологических решениях перечисленных выше проблем.

Аэростатная солнечная энергетическая система (АСЭС) является сложным комплексом, состоящим из двух основных элементов: аэростатной платформы и наземной инфраструктуры.

Аэростатные платформы представляют собой большие дискообразные дирижабли с установленными в верхней плоскости солнечными фотоприемниками. Подъемную силу обеспечивают баллоны с гелием, собранные в единый комплекс сложными несущими конструкциями. Фиксацию в пространстве обеспечивают несколько групп специально распределенных тросов, изготовленных из легких и высокопрочных материалов — кевлара и углеродного волокна. На тросе, проведенном к центральному блоку управления платформы, располагаются кабели передачи энергии. Все аэростатные платформы жестко зафиксированы и размещаются над основным плотным облачным слоем на высоте 6...7 км (рис. 1, см. четвертую сторону обложки) [5].

Основными элементами наземной инфраструктуры АСЭС являются блоки крепления тросов, корпус автоматизированного контроля, а также центр накопления и высвобождения энергии ночью, когда платформы, ввиду отсутствия солнечного света, не действуют. На земле также расположены все тяжелые элементы управления платформами, средства обслуживания и т. д.

Проблема 1 — зависимость мощностных показателей солнечных электростанций от погоды и географического положения

Если взглянуть на карту распределения солнечного излучения, можно заметить, что в России (рис. 2, см. четвертую сторону обложки) есть зоны северных широт, в которых активность солнечного излучения не уступает показателям южных регионов.

Это связано с распределением зон плотности облачного слоя — главной причиной потерь излучения на поверхности Земли [3]. И если в средних широтах солнечных дней может быть всего несколько десятков, то в том же регионе над облачным слоем Солнце светит в полную силу 365 дней в году. То есть, если

поднять солнечную электростанцию на высоту выше облачного слоя, первая проблема будет решена.

Важно подчеркнуть, что из-за описанной проблемы в северных широтах солнечная энергетика фактически отсутствует. Внедрение аэростатных систем откроет рынок для регионов с усложненными метеоусловиями, такими как Европа, Россия, Северная Америка, Индия, Китай, Бразилия и др. И, что немаловажно с экономической точки зрения, эти системы будут достаточно мощными для промышленного потребления и будут рентабельны даже без обеспечения постоянной государственной поддержки.

Проблема 2 — неспособность солнечных электростанций работать в темное время суток

Так как в темное время суток солнечные платформы неэффективны, для обеспечения круглосуточной подачи стабильной мощности на Земле устанавливается центр накопления энергии. В проектах аэростатных солнечных электростанций ранее предполагались динамические способы накопления энергии [4], располагаемые на несущих якорных тросах, однако, с учетом рабочих мощностей электростанций и высоких требований к надежности в проекте "Gelios", они заменяются мощными стационарными средствами накопления. Это могут быть тепловые элементы, системы накопления давления с последующим его сбросом и высвобождением энергии, также это могут быть сверхмощные электрические аккумуляторы, заряжающиеся днем и подающие энергию ночью. Несмотря на длительные исследования в данной области, вопрос нахождения наиболее оптимального способа накопления энергии остается открытым как для АСЭС, так и для солнечной энергетике в целом.

Проблема 3 — необходимость выделения обширных земельных площадей под строительство электростанций большой мощности

Важным преимуществом АСЭС можно назвать именно слово "аэростатный". Расположение большей части объемных конструкций в воздухе освобождает обширные земельные площади. Это особенно важно для густонаселенных регионов, где стоимость ограниченных земельных участков зачастую огромна. У аэростатных станций наземная инфраструктура не требует больших территорий и позволяет располагать электростанции практически в любом месте: от пустынь и горных массивов до территорий вблизи городов.

Проблема 4 — высокая стоимость солнечных панелей

Так как рабочая верхняя поверхность аэростатных платформ проста и универсальна, на нее можно устанавливать любые ныне существующие фотоэлементы: от классических кремниевых солнечных ба-

тарей — дорогих и высокоэффективных — до концентраторных солнечных батарей [6] и тонкопленочных фотоэлементов [7], имеющих меньший КПД, но и намного более дешевых. Кроме того, установка фотоэлементов на большой высоте обеспечивает низкую температуру окружающей среды, т. е. повышение эффективности работы полупроводников, а также минимизацию загрязняющих факторов (пыль, грязь, песок и т. д.), что, в свою очередь, снижает эксплуатационные издержки.

Экономические факторы создания платформ

Экономической проблемой аэростатных платформ, естественно, является их стоимость. Правда, можно отметить одну особенность разработки и строительства дирижаблей и аэростатных платформ, в частности. Несмотря на исполинские размеры, их стоимость довольно низка. Например, немецкая фирма Cargolifter AG возникла в 1996 г. и была создана для предоставления услуг транспортировки тяжелых грузов. Дирижабль CargoLifter CL160 (длина 260 м, диаметр 65 м, высота 82 м) предназначался для перевозки 160 т грузов на расстояние до 10 000 км [8]. К сожалению, до реализации проект доведен не был.

По оценкам специалистов, было необходимо около 400 млн долл. на разработку, создание дирижаблестроительного предприятия и нескольких дирижаблей [9]. К примеру, стоимость проекта регионального авиалайнера SuperJet-100 превышает 1,5 млрд долл., что считается для авиапрома небольшой суммой. В США крупнейший поставщик военной авиационной техники — корпорация Lockheed-Martin — начала разработку грузового дирижабля P-791, способного поднимать грузы массой до 400 т [9].

Стоит отметить также значительную активизацию дирижаблестроительной индустрии в России. Компания "ЛокомоСкай" к 2012 г. планирует начать в Ульяновской области производство дискообразных дирижаблей (рис. 3, см. четвертую сторону обложки) грузоподъемностью до 600 т [10].

У программы "Gelios" есть ряд достоинств, которые могут принести огромную выгоду государству, его реализующему, в нашем случае — для России. Эта программа может служить стимулом для развития других высокотехнологичных направлений промышленности. Высококачественные, легкие и прочные сплавы металлов, композиты и наноматериалы, сверхпрочные ткани, новейшая электроника, перспективные средства передачи и хранения энергии, применяемые в программе "Gelios", могут быть востребованы во многих других направлениях промышленности — от бытовой техники до тяжелой промышленности. Все необходимые технологии уже существуют и применяются, что снижает риски при исследованиях, однако запуск этого проекта потребует создания в России новых предприятий, производящих эти высокотехнологичные материалы, что

означает создание множества новых рабочих мест, а увеличение объемов производства приведет одновременно и к росту качества, и к падению стоимости выходных продуктов промышленности, а значит, к повышению конкурентоспособности отечественных производителей.

Кроме того, междисциплинарный характер проекта и его масштабы потребуют участия множества уже существующих организаций, действующих в этих областях:

- Роснано уже сейчас выделяет большие ресурсы на исследования в области фотовольтаических солнечных батарей и их внедрение;
- Росатом имеет огромный опыт разработок оборудования для энергетического комплекса;
- Ростехнологии сейчас специализируются на модернизации существующих и создании новых предприятий в перспективных областях промышленности;
- ОАК (Объединенная Авиастроительная Корпорация) имеет опыт работы со всеми материалами и технологиями, необходимыми для создания аэро-статных платформ.

Структура госкорпораций наиболее эффективна для реализации масштабных проектов, а распределение затрат значительно снизит финансовую нагрузку на участников.

Явная выгода и невысокая стоимость применения АСЭС вкупе с фактическим отсутствием конкурентов позволят российским производителям в случае быстрой реализации проекта легко захватить огромные энергетические рынки.

Список литературы

1. **Стребков Д. С.** Возобновляемая энергетика в третьем тысячелетии // Энергетическая политика. 2001. № 2.
2. **Группа Research-Techart** "Маркетинговое исследование рынка солнечной энергетики" // Исследование по заказу АНО "Технопарк Москворечье".
3. **European Photovoltaic Industry Association (EPIA).** Climate and Energy package adopted by the European Parliament. // www.epia.org, 2008.
4. **Коровкин С. В.** На пути к "высокой энергетике" // Информационный портал PROATOM (www.proatom.ru).
5. **Распределение** облачных слоев в атмосфере Земли // <http://ru.wikipedia.org>.
6. **Ершова Е. В., Овакимян К. Г., Григорьев Д. В.** Твердотельные солнечные батареи // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 12.
7. **Ершова Е. В., Овакимян К. Г.** Гибкие солнечные батареи // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 12.
8. **Проект CargoLifter CL160** // www.aerospace-technology.com/projects/cargolifter.
9. **Project P-791** // www.lockheedmartin.com — Lockheed Martin Aeronautics, Electronic, Information and Space Systems.
10. **Проект "Локомоскайнер"** // www.locomosky.ru — официальный сайт компании "ЛокомоСкай".

УДК 620.3+621.382.017.7+539.2

Е. В. Ершова, студентка, e-mail: evgersh@gmail.com,
К. Г. Овакимян, студент, e-mail: s-deimos@mail.ru,
Д. В. Григорьев, e-mail: grigorievd@yandex.ru,
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ

Обобщаются лучшие в России результаты по высокоэффективному преобразованию энергии Солнца твердотельными гетеропитаксиальными полупроводниковыми элементами. КПД таких батарей стабильно превышает 35 %, и видны пути его повышения. Рассмотрены и структура фотоэлемента, и конструкции солнечных ячеек, и контроль качества, а также выводы и перспективы развития солнечных модулей.

Ключевые слова: твердотельные солнечные батареи, полупроводники, концентраторы, линза Френеля

Введение

Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе (ФТИ) является одним из крупнейших научных центров России, в котором ведутся как фундаментальные, так и прикладные исследования в важнейших областях современной физики и технологий.

В данный момент ФТИ является одним из ведущих Российских научных центров, занимающихся проблемами солнечной энергетики и внедряющих перспективные инженерные решения.

ФТИ имеет собственные разработки концентраторных солнечных батарей, представляющих высокий интерес как весьма перспективных элементов будущей энергетической системы.

Основой солнечного элемента Иоффе является высокоэффективный гетероструктурный элемент. Для сохранения высокой эффективности батарей применяются достаточно дешевые линзы Френеля, концентрирующие солнечное излучение на поверхность элемента и повышающие его эффективность до 35...40 %.

Концентраторные солнечные батареи

Структура фотоэлемента. Основой концентраторной солнечной батареи является гетероструктурный фотоэлемент, выполненный по трехкаскадной схеме (рис. 1).

Рассмотрим структуру "сверху вниз" (рис. 1):

- для снижения контактных потерь с внешними материалами применяется соединение серебра или золота (Ag/Au);

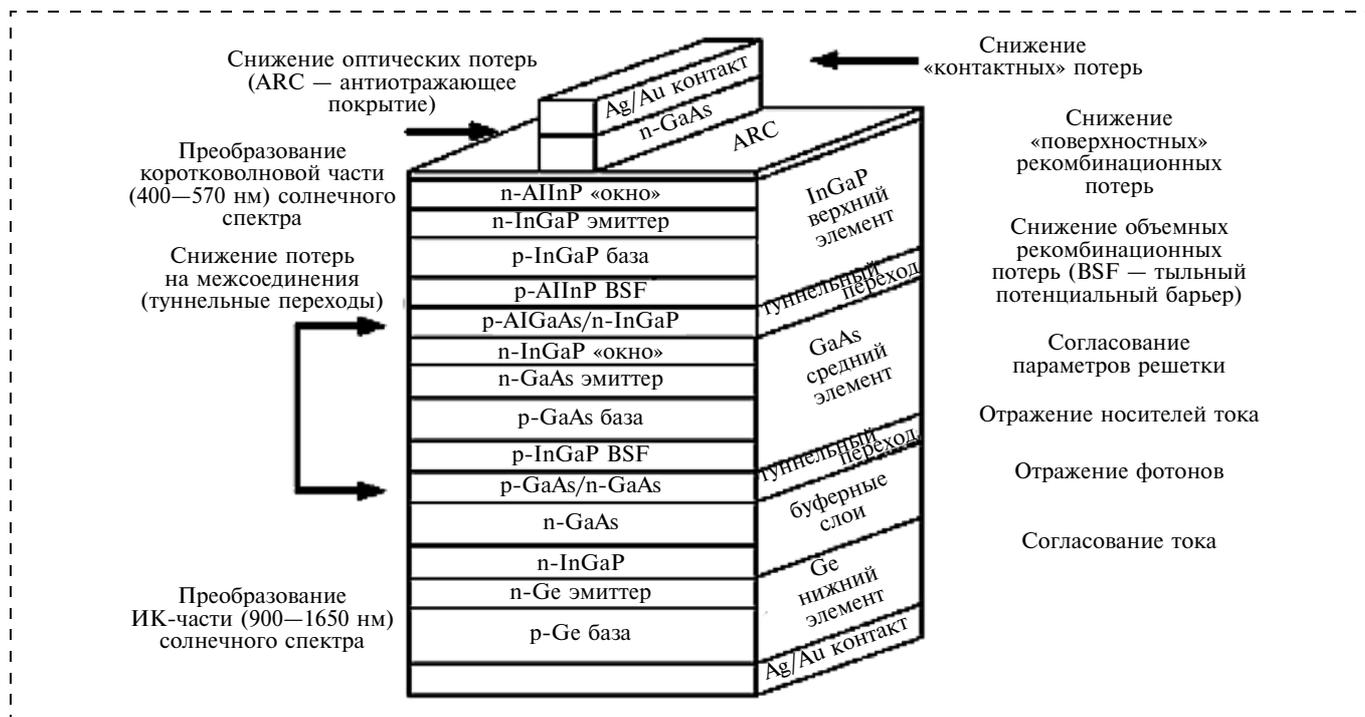


Рис. 1. Гетероструктура фотоэлемента

- ARC (Anti Reflexion Covering) применяется для минимизации энергетических потерь отражения солнечного света от поверхности элемента;
- ниже идет первый светопоглощающий каскад на основе фосфида индия—галлия (InGaP). Первый каскад предназначен для поглощения коротковолновой части солнечного спектра 400...670 нм.
- буферный p -AlInP слой необходим для снижения объемных рекомбинационных потерь (BSF—тыльный потенциальный барьер);
- туннельный переход необходим для снижения потерь на межсоединения;
- затем следует второй светопоглощающий каскад на основе GeAs. На этом каскаде происходит поглощение излучения с длиной волны 670...900 нм;
- буферные слои n -GaAs и n -InGaP предусмотрены для отражения фотонов;
- нижний элемент на основе германия Ge отвечает за преобразование инфракрасной части (900...1650 нм) спектра;
- последним слоем является электрод из соединения серебра и золота (Ag/Au).

Элемент состоит из задней поверхности, базы, буферных слоев и эмиттера. На Ge формируют базу, эмиттер и окно. Буферные слои соединяются туннельными переходами, которые формируются из сильнолегированных слоев толщиной порядка 10...20 нм. Использование различных материалов GaInP (верхний слой), GaAs (средний слой) и Ge (нижний слой) позволяет разделить и использовать весь солнечный спектр. Три фотоактивных p — n -перехода соединены между собой двумя промежуточ-

ными n^+ - и p^+ -туннельными переходами. Для снижения потерь туннельные переходы сильно легируются. Два буферных слоя были изготовлены для минимизации диффузии легирующей примеси из n^+ - и p^+ -слоев в обоих туннельных переходах. Эффективность ячейки напрямую зависит от наличия этих переходов. Это условие особенно ярко выражено в случае использования систем с концентраторами света.

На рис. 2 подробно показана схематическая структура AlGaAs/GaAs многослойной солнечной ячейки. Используются два вида технологий: рост структуры с помощью метода жидкостной эпитаксии (рис. 2, а) и химическое осаждение из паровой фазы металлоорганических соединений — газофазная технология (рис. 2, б). С помощью второго метода вы-

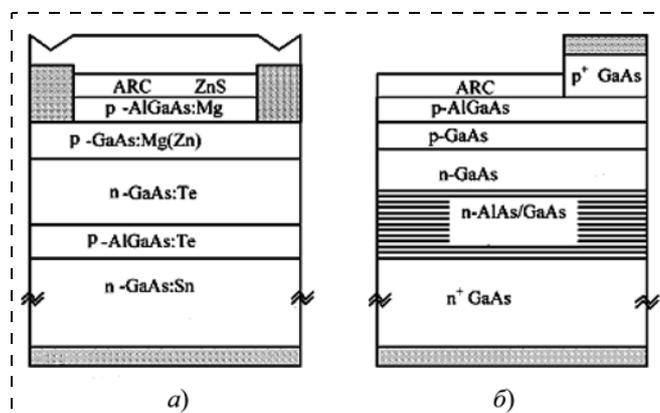


Рис. 2. Метод жидкостной эпитаксии (а); химическое осаждение из паровой фазы металлоорганических соединений (б)

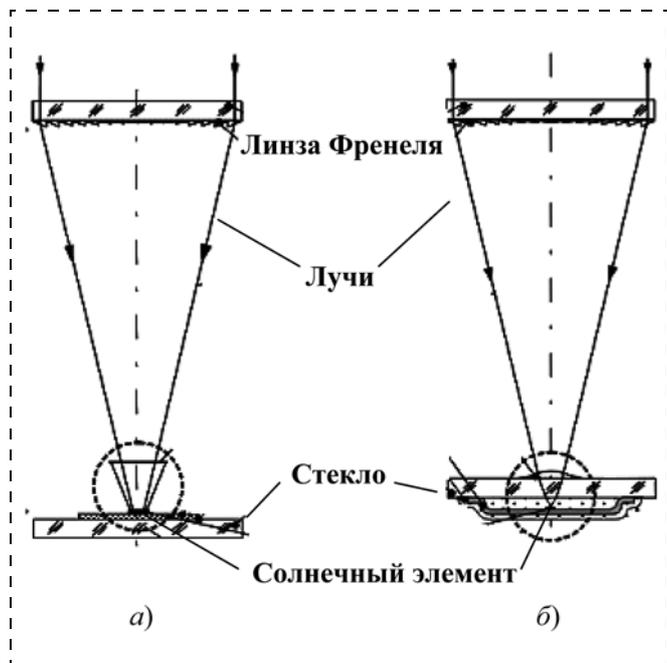


Рис. 3. Принципиальная схема фотовольтаической ячейки:
a — без дополнительного защитного корпуса; *б* — с защитным корпусом

рашиваются встроенные слои, так называемые "береговские зеркала" (12 пар из AlAs (72 нм)/GaAs (59 нм)), позволяющие более эффективно преобразовывать спектр. При этом толщина базового слоя может быть снижена до 1...1,5 мкм.

Несмотря на большую стоимость гетероструктурных батарей по сравнению с чисто кремниевыми использование таких батарей актуально по следующим причинам:

- значительное увеличение КПД (КПД модуля составляет $\approx 25\%$ при КПД элементов $\approx 35\%$);
- большой эксплуатационный срок (примерно 20...25 лет);
- высокий рабочий диапазон температур (примерно 80°C , при этом деградации линз не наблюдается);
- вероятность сбоя работы солнечной ячейки 1...2 %;
- при выходе из строя одного элемента вся конструкция не выходит из строя;
- уменьшение размеров солнечных батарей (размер одного солнечного модуля $0,5 \times 0,5$ м).

Расходы на материалы для изготовления гетероструктурного элемента снижаются за счет уменьшения размеров теплоотводящих конструкций.

Варианты конструкций солнечных ячеек. В ФТИ им. А. Ф. Иоффе производят модули солнечных элементов двух следующих конструкций:

- фотоэлемент окружается вокруг алюминиевым защитным корпусом с отверстием для фронтального проникновения света, после чего данная конструкция устанавливается на текстолитовую

пластину. За слоем текстолита крепится теплоотводящий элемент в виде медного диска. К солнечному элементу ультразвуковой сваркой припаяна проволока для переноса теплоты в теплоотвод (диаметром порядка 50 мкм). Эта структура крепится фронтально силиконом к стеклу фирмы "Solargrey" (рис. 3, *a*, рис. 4, см. третью сторону обложки);

- фотоэлемент устанавливается непосредственно на медный теплоотводящий элемент (в данном случае прямоугольный), который окружает сзади текстолитовую форму с вырезанным объемом для фотоэлемента. Эта конструкция крепится силиконом на заднюю сторону стекла фирмы "Solargrey". Так как фотоэлемент, собранный по данной схеме, окружен сзади теплоотводящим элементом, а спереди закрыт стеклом, необходимость в алюминиевом защитном корпусе отпадает (рис. 3, *б*, рис. 5, см. третью сторону обложки). Схемы на текстолите и стекле выстраиваются в ряд. Соответственно, поставленные параллельно ряды формируют принимающую часть солнечной батареи.

В работах ФТИ им. А. Ф. Иоффе все отмеченные нами особенности подробно обосновываются и анализируются [1, 2].

Контроль качества. Отказы фотоэлементов обнаруживаются на этапе постпроизводственного тестирования с помощью стандартных излучателей света и устройств измерения мощностей. В случае отклонений от нормы забракованный элемент удаляют из модуля.

Однако серийное производство фотоэлементов с помощью точного автоматизированного оборудования и постоянного контроля качества применяемых материалов доводит число бракованных элементов до показателя менее 5 %. А дополнительные проверки при создании концентраторной батареи снижают риск отказа к минимуму. При обеспечении должной культуры производства надежность и качество солнечных батарей обеспечивается в течение гарантированного срока службы — 25 лет.

Блоки солнечных батарей в сборке. Для максимального увеличения КПД солнечной батареи применяются линзы Френеля (рис. 6). Меньшие (по сравнению с обыкновенными линзами) размеры делают эту конструкцию более выигрышной. Линзы Френеля размером 40×40 мм фиксируются поверх всей конструкции с фотоэлементами (размер фотовольтаической ячейки — 3×3 мм). При этом очень важно разместить линзы так, чтобы падающий свет концентрировался именно на солнечной ячейке.

Применение линз позволяет обеспечить тысячекратное увеличение концентрации солнечного света. Несмотря на высокую концентрацию излучения фотоэлемент греется незначительно — небольшого медного теплоотводящего элемента достаточно для обеспечения рабочей температуры не выше 80°C с резервом стабильности работы фотоэлементов до

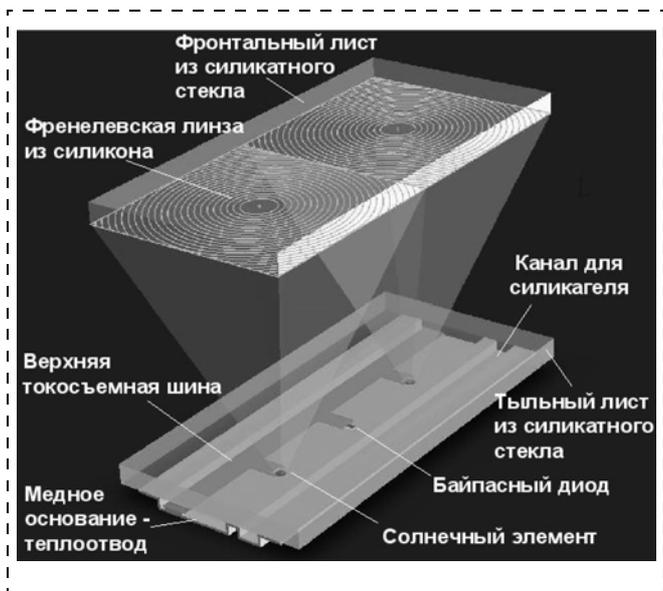


Рис. 6. Конструкция блока солнечной ячейки с линзами Френеля

100 °С. После этого линзы и светоприемники устанавливаются в специальные металлические боксы (рис. 7).

Блоки солнечных батарей и система управления конструкцией. Для постоянной эффективной работы в течение дня солнечные батареи должны быть постоянно наведены на Солнце. Для этого боксы с батареями (рис. 8) устанавливаются на специальную динамическую платформу, оснащенную системой слежения и наведения под оптимальный угол приема света.

Для слежения за расположением Солнца применяют стандартный датчик потока излучения. С по-



Рис. 7. Готовый блок солнечных батарей с линзами Френеля

мощью маломощного электромотора он корректирует перемещения платформы под оптимальный угол для приема света. Перемещение платформы на десятые доли градуса осуществляется несколько раз в минуту, что позволяет обеспечивать максимальные мощностные показатели в реальном времени без участия операторов.

Выводы и перспективы развития солнечных модулей

Существует два направления оптимизации солнечных модулей:

- оптимизация технологии в целях снижения общей стоимости (т. е. увеличение выходного производства солнечных элементов);
- использование более тонкой подложки (существующие подложки для ячеек на основе Ge — 150 и 90 мкм).

После попыток создать более сложную гетероструктуру с четырьмя и пятью $p-n$ -переходами были сделаны следующие выводы:

- рост КПД при увеличении числа $p-n$ -переходов не зафиксирован (при числе $p-n$ -переходов больше трех);
- все слои становятся значительно тоньше, что приводит к увеличению радиационной стойкости;
- технология согласования слоев и всех $p-n$ -переходов становится сложнее.

В настоящее время в США ведутся разработки следующего поколения солнечных элементов. Применяются технологии роста структур в обратном порядке, благодаря чему оптимизируется использование солнечного спектра. Вначале происходит рост всех технологических слоев (InGa, GaAs, Ge), после чего отделяется подложка, переворачивается тонкая структура и, таким образом, более оптимально распределяется спектральная чувствительность.

Кремниевые батареи наряду с невысокой стоимостью и относительной простотой изготовления имеют ряд недостатков:

- относительно невысокий КПД (до 16 %);
- высокая концентрация дефектов (процент выхода годных до 85...90 %);
- увеличение площади элементов приводит к увеличению расходов на материалы;
- меньший срок службы по сравнению с другими видами солнечных ячеек.

Остается актуальным вопрос о создании светоотражающего покрытия. На данный момент оптимальный состав покрытия не подобран вследствие изменения спектральных характеристик излучения.

По сравнению с кремниевыми модулями концентраторные батареи обладают более высоким КПД, сроком службы и рядом достоинств, которые делают их серьезной альтернативой традиционным кремниевым моделям.

В заключение скажем, что ГК "Роснано", ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН и Module Solar AG подписали

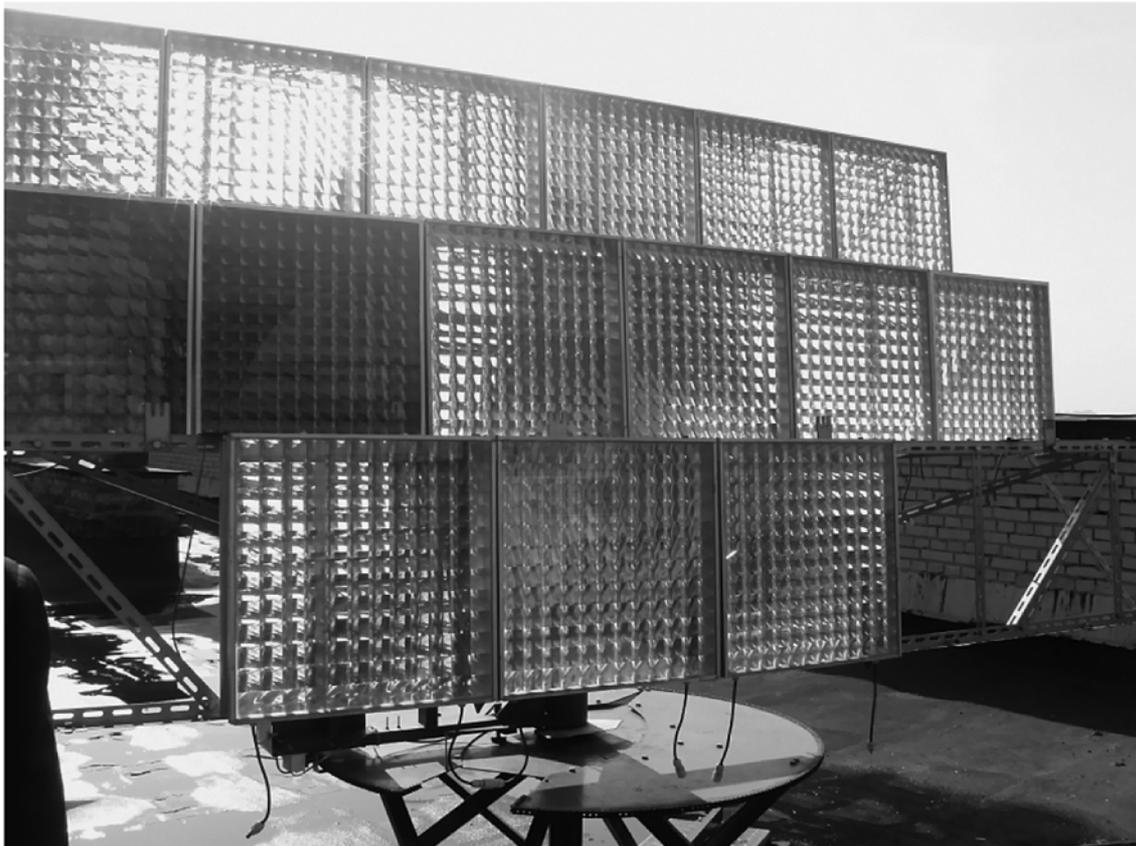


Рис. 8. Блоки солнечных батарей

соглашение о производстве наногетероструктурных преобразователей с запуском с первого квартала 2013 г. в Санкт-Петербурге серийного производства модулей мощностью 75 МВт. Ожидаемая выручка составит к 2015 г. 130 млн евро [3].

Студенты НИЯУ МИФИ благодарят коллектив ФТИ имени А. Ф. Иоффе и особенно Николая Садчикова.

Список литературы

1. **Обзор** Российских исследований по фотовольтаике "An overview of Russian activities in CPV" // Пятая междунар. конф. в Калифорнии, 16–19 ноября 2008 г.
2. **Алферов Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д.** III–IV-гетероструктуры в фотовольтаике // Concentrator Photovoltaics. 2007. С. 25–50.
3. **Проект** солнечные энергоустановки. URL: <http://www.rusnano.com/Document.aspx/Download/25850>.

УДК 620.3+621.382.017.7+539.2

Е. В. Ершова, студентка, e-mail: evgersh@gmail.com,
К. Г. Овакимян, студент, e-mail: s-deimos@mail.ru,
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
О. А. Свергун, аспирант,
 Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

ГИБКИЕ СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ

Рассмотрены различные виды солнечных батарей и способы их изготовления. Приведены результаты экспериментов по изготовлению фотовольтаических ячеек на основе органоуполупроводниковых материалов, а также сделаны выводы об их эффективности и недостатках.

Ключевые слова: солнечная энергетика, фотовольтаические ячейки, гибкие органические солнечные батареи, органоуполупроводниковые материалы, органические солнечные батареи с повышенным КПД

Актуальность темы

Во всем мире активно изучаются возможности повышения КПД (до 10...15 %) органических солнечных батарей, что может позволить снизить цену преобразования энергии Солнца в электрическую. Согласно расчетам стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, производимой органическими батареями, должна составлять 1...2 цента. Низкая стоимость органических батарей связана с простой технологией

их изготовления и малыми затратами при их производстве. Органические полупроводники обычно растворимы в органических растворителях, что позволяет делать из них жидкие "чернила" и наносить их методом печати на гибкие полимерные подложки. Такая технология уже разработана и используется многими западными компаниями, достигшими значений КПД 8 %.

Гибкость — другое важное преимущество органических солнечных батарей. Органические полупроводники дают возможность получения гибких пластичных пленок, что является важнейшим преимуществом этого класса материалов. Такие батареи можно интегрировать в одежду, облицовочные покрытия, упаковку продуктов и др. Их можно скатывать в компактные рулоны, легко транспортировать, а при необходимости разворачивать и использовать в качестве компактных источников энергии.

Почти все конфигурации органических фотовольтаических ячеек можно разделить на две группы:

- батареи "слоистого типа", в которых фотоактивные компоненты наносятся отдельными слоями;
- батареи с "объемным гетеропереходом", в которых есть только один фотоактивный слой, представляющий собой смесь донора и акцептора.

Эти два типа батарей различаются не только по структуре, но и по используемым материалам и способам их нанесения.

Данная статья написана студентами НИЯУ МИФИ, которые не только изучали соответствующую литературу, но и участвовали в изготовлении фотовольтаических ячеек на основе органоуполупроводниковых материалов с КПД до 6 % в лабораториях БРУИР (г. Минск) и МИРЭА.

Изготовление фотовольтаических ячеек на основе органоуполупроводниковых материалов

В ходе эксперимента были сформированы несколько подложек с фотовольтаическими ячейками. В конкретных условиях лаборатории было решено напылять пленки РТСВИ и CuPc методом термовакuumного осаждения. Испробованы варианты послойного и смешанного напыления пленок.

Первым этапом работы является *очистка подложки* с нанесенным слоем ИТО (Indium tin oxide). Делают это с помощью поверхностно-активных веществ, а для более тщательной очистки подложки опускают в раствор хромпика (5 %-й бихромат калия в концентрированной серной кислоте). Это необходимо для того, чтобы сделать поверхность гидрофильной. Затем подложку промывают в поточных водах и сушат в парах изопропилового спирта.

Для выравнивания шероховатостей, а также для улучшения контакта между первым электродом (ИТО) и последующими слоями на подложку *наносится слой PEDOT-PSS* (1,3 %-й водный раствор).

Все реактивы и материалы, использованные в описанном эксперименте, произведены фирмой "Aldrich".

Этап нанесения PEDOT-PSS является единственным жидкофазным методом, применяемым в данном технологическом процессе.

Исходный раствор PEDOT-PSS разбавляли водой в пропорции 1 : 3 и равномерно наносили с помощью шприца на подложку. Подложку помещали в центрифугу, которая раскручивается до 4000 мин⁻¹. Для формирования пленки нужной толщины (примерно 20 нм) достаточно 2 мин.

Тестовый образец кремния (спутник) и одна из полученных подложек крепятся по технологии face-down (проводящими контактными площадками — вниз) на металлический подложкодержатель. Спутник необходим нам для дальнейшего измерения толщины напыленных слоев.

Далее подложкодержатель помещали в рабочую камеру вакуумно-универсального поста (ВУП-5). Как уже было упомянуто выше, для напыления пленок применяется метод термовакuumного осаждения.

В два стаканчика из коррозионно-стойкой стали (они выдерживают температуру до 400 °С) засыпали соответственно порошки CuPc (фталацианин меди — 30 мг) и РТСВИ (дибензимидазол перилена 3-, 4-, 9-, 10-тетракарбоновой кислоты — 15 мг). Стаканчики помещали в нихромовые нагреватели, изолированные от источников напыления керамической прослойкой. Таким образом, использовали косвенный резистивный нагрев. Перед тем как устанавливать стаканчики в ВУП-5, необходимо очистить источники. Это можно выполнить стандартным методом с помощью нагрева. Температуру источников в ВУП-5 измеряли с помощью термопары (хромель-алюмель) и вольтметра.

На данной установке работу проводили с вакуумом порядка $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па. С помощью частотомера измеряли толщину кварцевой пластинки, которая менялась по мере осаждения на нее материала. Погрешности измерений толщины напыленных слоев связаны с неравномерностью нагрева источников, т. е. скорость напыления слоев меняется со временем. Изначально испаряются легкие фракции, а только затем, по мере более сильного нагрева, — тяжелые. К сожалению, на конкретном оборудовании невозможно точно проконтролировать толщину напыления пленок.

В ходе эксперимента методом молекулярно-лучевого осаждения на пластинку с ИТО были послойно напылены материалы CuPc и затем РТСВИ (образец 1). Чем толще пленки, тем меньше становятся токи. Но в то же время при более толстых слоях мы наблюдаем меньше проколов на ячейке, и напряжение становится стабильнее.

На рис. 1 представлена структура полученной ячейки. Зная приблизительную скорость напыления пленок (измеренную в нм/мин) и нужную толщину пленок (указана в нм на рис. 1), можно определить

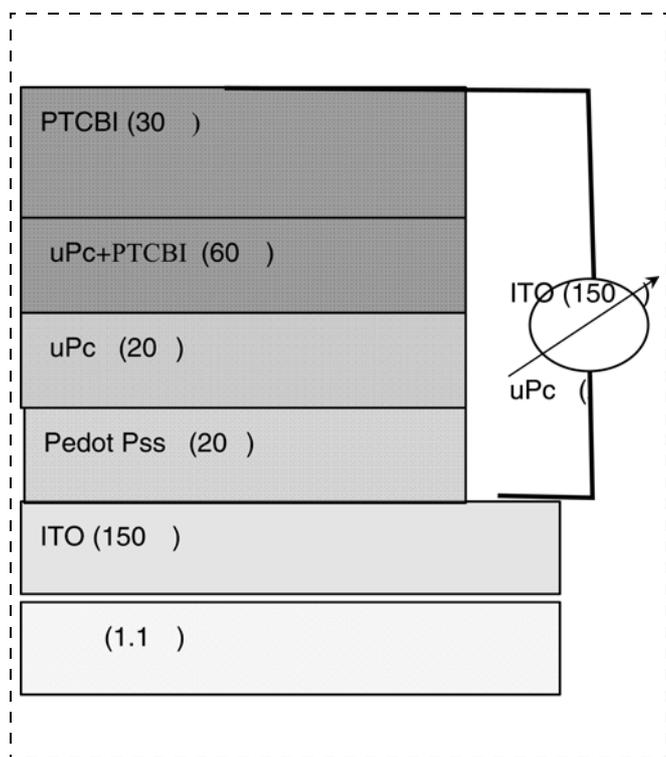


Рис. 1. Схема слоев в фотовольтаической ячейке с указанием катодного и анодного слоев и примером подключения измерительного прибора (образец 1)

время напыления каждого слоя. Позже по этим данным была рассчитана толщина каждого напыленного слоя в нанометрах, а затем подтверждена измерениями на микроскопе МИИ-4. Также на рис. 1 показаны слои, с которых проводятся непосредственные измерения (пленка ITO играет роль анода, а слой PTCBI — катода).

В ходе эксперимента была проведена попытка одновременного напыления пленок (образец 2).

Разница с первым экспериментом заключается в том, что в данном случае включаются оба источника одновременно. Соответственно, порошки начинают испаряться примерно в одно и то же время, и вместо послойных участков мы получили смешанный слой.

Регулирование скорости нанесения, как и в предыдущем случае, осуществляется с помощью изменения температуры источника за счет изменения напряжения на источнике питания.

Работа проводилась не с полимерами, а с низкомолекулярными полупроводниками, так как в лаборатории БГУИР это направление считают более перспективным. По этим же причинам жидкие методы из технологической цепочки были исключены.

Напыление органических слоев на гибкую пленку принципиально ничем не отличается от приведенного выше опыта.

Исследование влияния температуры отжига на параметры ячейки

Образец 2 был поделен на две части (образец 2А и образец 2В). Отжиг образцов проводился в рабочей камере установки ВУП-5. Были опробованы несколько вариантов:

- вакуум 10^{-4} мм. Отжиг в вакууме под лампой в течение 5 мин;
- вакуум $8 \cdot 10^{-5}$ мм. Отжиг в вакууме под лампой в течение 10 мин.

Давление в обоих случаях составило $534 \cdot 10^{-5}$ Па, время отжига 13 мин. Токи и напряжения после отжига увеличились.

В результате отжига параметры обоих образцов улучшились. Но несмотря на это, судя по маленькому току, необходимо было напылять более тонкие слои пленок.

Чтобы определить реальную толщину напыленных слоев, использовали микроскоп МИИ-4. Принцип действия прибора основан на явлении интерференции света.

Результаты измерений:

135 нм — толщина всех органических слоев на образце 2;

105 нм — толщина всех органических слоев на образце 1;

160 нм — толщина металла на обоих образцах.

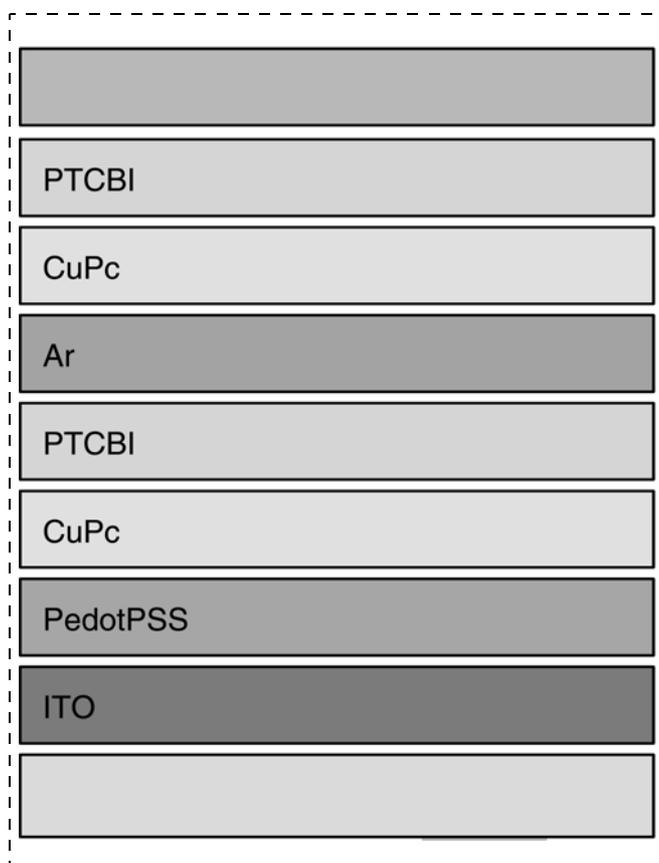


Рис. 2. Структура многослойной ячейки (образец 2)

Учитывая результаты эксперимента, было решено напылить многослойную структуру, представленную на рис. 2. Были сделаны измерения, необходимые для дальнейшего определения эффективности солнечной ячейки. Основной характеристикой органической солнечной батареи является вольт-амперная характеристика (ВАХ), измеренная в стандартных условиях. Для имитации солнечного излучения использовался симулятор спектра солнечного света с удельной мощностью светового потока 71 мВт/см^2 . По полученным ВАХ были определены три основных параметра: напряжение холостого хода $U_{\text{хх}}$, сила тока короткого замыкания $I_{\text{кз}}$ и фактор заполнения hh . Погрешности измерений в основном связаны с нагреванием ячеек от имитатора солнечного излучения в ходе измерений. В результате были сделаны следующие выводы: полученные напряжения значительно выше напряжений на всех предыдущих образцах, но силы тока приблизительно того же порядка. По измеренным параметрам также были найдены наиболее "эффективные" ячейки.

Выводы: образец 1, полученный послойным напылением, обладает лучшими качествами по сравнению с образцом 2 (полученным одновременным напылением материалов из источников). По результатам эксперимента сделан вывод о том, что были напылены слишком толстые слои, после чего в целях улучшения основных параметров были проведен отжиг образца 2. Обычно при отжиге фотовольтаической ячейки напряжение на ней падает, а токи растут. На рис. 3 приведен пример ВАХ одной из полученных ячеек.

По ВАХ при нулевом значении приложенного напряжения определяется плотность тока короткого замыкания ($I_{\text{кз}}$), а также напряжение, которое нужно приложить, чтобы скомпенсировать ЭДС ячейки (т. е. привести ток к нулю), называемое напряжением холостого хода ($U_{\text{хх}}$).

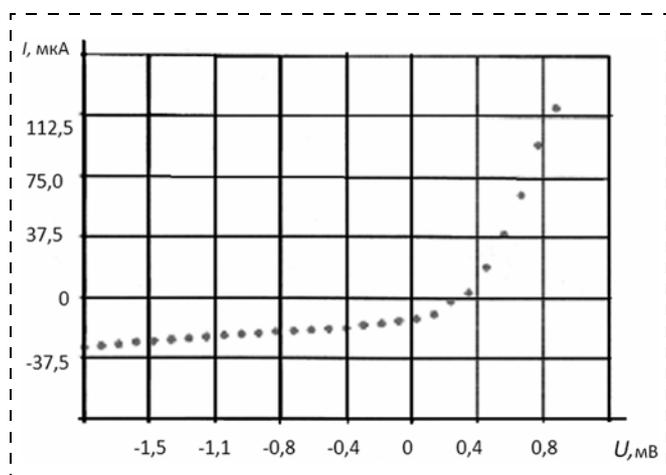


Рис. 3. Пример вольт-амперной характеристики фотовольтаической ячейки

Для определения КПД необходимо вычислить фактор заполнения. Для этого на ВАХ необходимо найти точку максимальной мощности. Если в каждой точке кривой вольт-амперной характеристики в четвертом квадранте перемножить координаты (ток на напряжение), то найдется некая точка, в которой это произведение максимально по абсолютной величине. Эта точка называется точкой максимальной энергии, она определяет реальную эффективность фотовольтаического элемента. В этой точке принято обозначать $I = I_{\text{max}}$, $U = U_{\text{max}}$. Если выражать фактор заполнения графически, то это отношение площади прямоугольника со сторонами I_{max} и U_{max} к площади прямоугольника со сторонами $I_{\text{кз}}$ и $U_{\text{хх}}$. При благоприятных условиях hh стремится к 1. В данном эксперименте наилучшим фактором заполнения обладала ячейка из образца 1 ($hh = 0,42$). Затем по стандартным формулам рассчитываем КПД ячейки.

Пример вольт-амперной характеристики фотовольтаической ячейки $hh = 0,4$ — фактор заполнения.

Можно сделать следующие выводы.

Низкое значение КПД = 0,42 % объясняется недостаточно высокой степенью откачки рабочей камеры (резко ухудшающий параметры некоторых материалов, достигается вакуум $667,5 \cdot 10^{-5}$ Па) и наличием разгерметизации в технологическом процессе. Кроме того, в ВУП-5 невозможны очистка подложки в рабочей камере, напыление оксидов металлов, а также возникают сложности в процессе регулирования стехиометрического состава перемешанных органических слоев.

Необходимые требования для повышения КПД батарей на основе органополюпроводниковых материалов:

- повысить вакуум в рабочей камере (10^{-6} Па);
- исключить из технологического процесса "жидкие" методы (заменить нанесение PEDOT-PSS на нанесение оксидов металлов или других органических соединений);
- исключить из технологического процесса разгерметизацию рабочего объема — автоматизировать процесс совмещения подложки и маски;
- увеличить число источников напыления органических полупроводников и металлов (6 — для органических соединений, 2 — источники для сублимации металлов).

В результате обобщения перечисленных требований был проведен анализ выпускаемого зарубежными фирмами специализированного оборудования для разработки и мелкосерийного производства фотовольтаических ячеек.

По совокупности технических характеристик, стоимости и с учетом задач, которые предстоит решить, наиболее целесообразным представляется приобретение системы HELISYS компании ANS Inc., Корея.

Такая установка позволяет обрабатывать технологические процессы и реализовывать мелкосерийное производство ячеек на подложках размером 200 × 200 мм. Система содержит камеру для первоначальной обработки, камеру для нанесения органических слоев, камеру для нанесения металлических слоев и камеру для извлечения.

Равномерность по толщине нанесенных слоев во всех рабочих камерах составляет ±5 %.

Точность совмещения пары маска—подложка: при автоматическом совмещении с использованием МЗС-матрицы составляет ±10 мкм, при ручном совмещении ±150 мкм.

На выходе установки получают готовые загерметизированные структуры, дополнительно герме-

тично покрытые стеклянной пластиной и готовые к передаче на резку на более мелкие форматы.

Список литературы

1. Трошин П. А., Любовская Р. Н., Разумов В. Ф. Органические солнечные батареи: структура, материалы, критические параметры и перспективы развития // Нанообзоры. 2008. Т. 3. № 5—6.
2. Шука А. А. Нанoeлектроника. М.: Физматкнига, 2007.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984.
4. <http://www.eren.doe.gov>
5. Айвазов А. А., Будагян Б. Г., Вихров С. П., Попов А. И. Неупорядоченные полупроводники. М.: Высшая школа, 1995. 352 с.

УДК: 658:620.9

Д. В. Григорьев, студент, e-mail: grigorievd@yandex.ru, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

ЭКОНОМИКА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Данная статья носит экономический характер. В ней показаны ключевые игроки рынка солнечных преобразователей, а также дан прогноз на изменение цены энергии, получаемой от Солнца.

Ключевые слова: энергетика, альтернативная энергетика, полупроводники, Европейская ассоциация фото-вольтаики, солнечные мощности

Еще совсем недавно полагали, что фотоэлектрический метод преобразования солнечной энергии имеет перспективы развития для наземной энергетики лишь для решения частных задач, например, для автономных систем электропитания в труднодоступных или удаленных районах. Так, например, в 1975 г. суммарная мощность всех солнечных электроустановок на полупроводниковых фотоэлементах составляла около 300 кВт стоимостью более 20 тыс. за пиковый киловатт мощности [1], а к 2010 г. мощность таких установок составляла примерно 23 ГВт, что позволяет в год использовать примерно 25 ТВт электроэнергии [2].

Если в 1975 г. стоимость киловатта энергии, получаемого от Солнца, составляла около 2\$, то сегодня — от 0,15\$ до 0,50\$ за кВт·ч (в среднем — 0,25\$ за кВт·ч) в зависимости от широты, долготы, страны и т. д. По мнению Европейской ассоциации фото-вольтаики (EPIA), к 2020 г. стоимость электроэнергии, вырабатываемой "солнечными" системами, снизится до уровня менее 0,10 € за кВт·ч для промышленных установок и менее 0,15 € за кВт·ч для установок в жилых зданиях.

Однако сегодня, спустя два года, данные цифры и прогнозы стоит пересмотреть из-за появления новых игроков на рынке солнечных батарей. На рынок выходят новые игроки, которые могут потеснить уже традиционных производителей солнечных батарей. Речь идет о Китае и Индии — странах с благоприятным климатом, огромным человеческим потенциалом и вовлеченностью государства в проблемы энергетики своих стран.

Китай уже начал активное производство солнечных преобразователей. Так, в 2009 г. мощность солнечных электроустановок составила 305 МВт. Кажется, это всего лишь 1 % от мировых мощностей, но этот процент был получен за последние два года, а прирост за год составил 110 %! Прогноз Китая к 2014 г. — 2,5 ГВт, что будет составлять уже более 8 % (за четыре года). При этом правительство Китая планирует, что к 2020 г. в энергетической корзине страны должно приходиться 6 % на альтернативную энергетику.

Что же до Индии, то страна планирует выйти от 30 МВт в 2009 г. к 1,5 ГВт к 2014 г.

На рис. 1 (см. третью сторону обложки) представлены данные по развитию солнечной энергетики в последние годы. В таблице спрогнозирован рост солнечных мощностей. Прогноз дан на основе Global market outlook for photovoltaic's until 2014.

Именно эти две страны будут в дальнейшем стимулировать развитие солнечной энергетики не только у себя, но и на всем рынке солнечной энергетики.

Рост солнечных мощностей Китая и Индии (в МВт)

| Страна | 2010 | 2011 | 2012 | 1913 | 1914 |
|--------|------|------|------|------|------|
| Китай | 600 | 1000 | 1250 | 1800 | 2500 |
| Индия | 300 | 500 | 700 | 900 | 1500 |

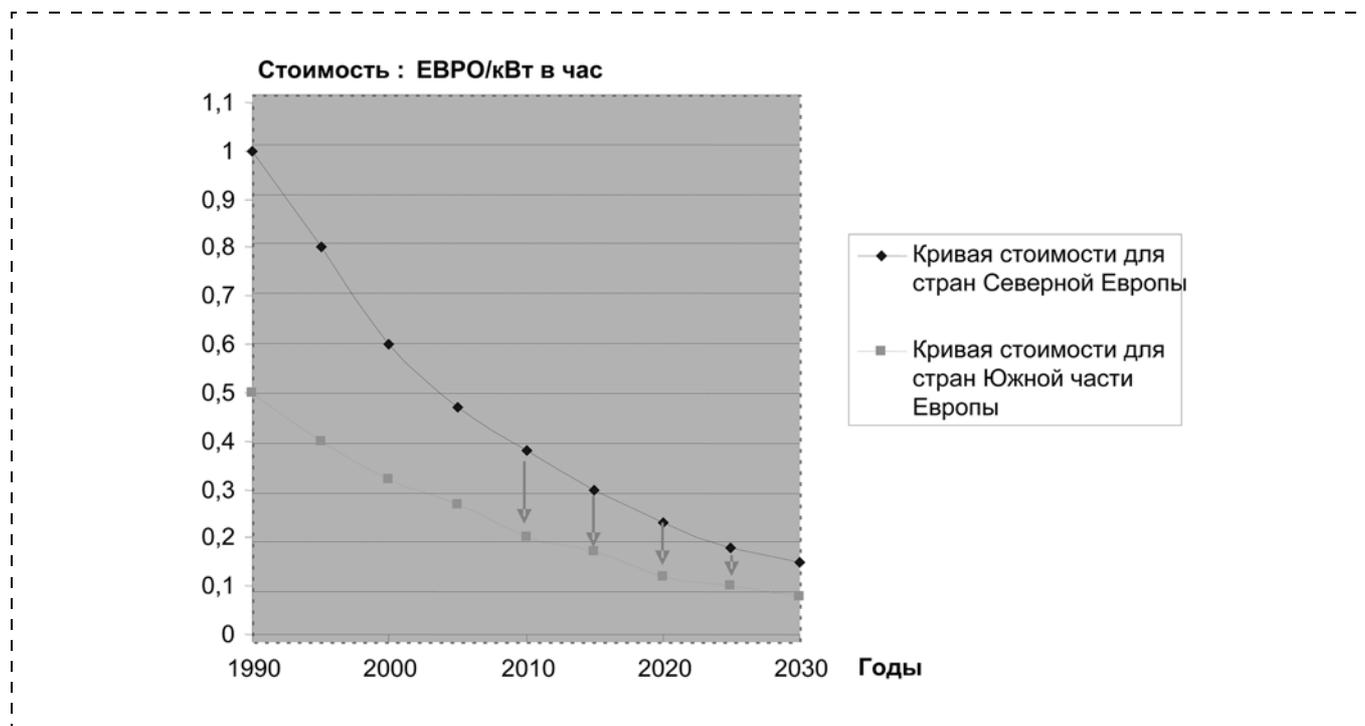


Рис. 2. Стоимость электроэнергии от солнечной энергетики для стран Северной и Южной Европы. Стрелками показано возможное изменение цены из-за выхода на рынок фотовольтаики Китая и Индии

Стоимость "солнечного" электричества (рис. 2) сравнивается со стоимостью электричества, генерируемого тепловыми электростанциями, в ближайшие пару лет в некоторых странах Южной Европы (Италии, Испании), а в течение 2—5 лет — и в других странах (таких как Германия, Италия, Япония и Испания) и регионах США (например, в Калифорнии), где розничные цены на электроэнергию для бытовых потребителей уже достигают 0,36...0,40\$ за кВт·ч).

Стоимость современной солнечной электростанции (СЭС) определяется, в первую очередь, стоимостью солнечного модуля, изготавливаемого из солнечного элемента на основе кремния. При объеме производства 1 ГВт/год стоимость модуля составляет уже сейчас 4000 \$/кВт, а стоимость СЭС — 6000—8000 \$/кВт. Однако к 2020 г. или ранее можно снизить стоимость СЭС до 1000 \$/кВт.

При таких стоимостных показателях можно уверенно говорить о применении солнечной энергетики не как энергетики для автономных районов или локальных целей, а как о важнейшей составляющей энергетической корзины страны и мирового энергетического баланса.

Список литературы

1. **Будущее** солнечной энергетики. Интернет-интервью с Ж. И. Алферовым // Наука и жизнь. URL: <http://www.nkj.ru/interview/8370/>
2. **Взгляд** на рынок фотовольтаики до 2014 года. European Photovoltaic Industry Association. www.epia.org. URL: http://www.epia.org/fileadmin/EPIA_docs/public/Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_until_2014.pdf
3. **Конкурентоспособность** солнечной энергетики. URL: <http://www.nitolsolar.com/rucompetitiveness/>

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ "НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА" В 2010 Г.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

- Агеев О. А., Сюрюк Ю. В., Коломийцев А. С., Сербу Н. И.** Исследование влияния концентрации углеродных нанотрубок на электрическое сопротивление пленок полимерного нанокомпозита. № 10
- Алексенко А. Г., Ефимов Н. Н., Паршуков В. И., Пономарев А. Н.** Наномодификация твердого топлива для тепловых электростанций. № 2
- Аракелян С. М., Коростелев В. Ф., Кутровская С. В., Кучерик А. О., Кирилина А. Н.** Наноиндентирование углеродных нанотрубок, пропитанных расплавом алюминия под давлением. № 9
- Бобринецкий И. И., Неволин В. К., Симунин М. М., Комаров И. А.** Роль поверхности тонкопленочных катализаторов при росте углеродных нанотрубок в задачах электроники и сенсорной техники. № 5
- Булярский С. В., Басаев А. С., Галперин В. А., Павлов А. А., Пятилова О. В., Цыганцов А. В., Шаман Ю. П.** Гомогенное и гетерогенное формирование кластеров катализаторов для роста углеродных нанотрубок. № 7
- Герус С. В., Гуляев Ю. В., Лобанов Б. С., Митягин А. Ю., Соколовский А. А., Темиряева М. П., Фесенко М. В., Хлопов Б. В.** Влияние внешних магнитных полей на информационную магнитную структуру современных жестких дисков. № 11
- Карташев В. А., Карташев В. В.** Определение формы и размера острия иглы туннельного микроскопа. № 10
- Куковицкий Е. Ф., Львов С. Г.** Углеродные нанотрубные автокатоды на никелевых ядрах. № 6
- Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Галиев Г. Б., Бугаев А. С., Сеничкин А. П., Гнатюк Д. Л.** Разработка сверхвысокочастотной нанoeлектроники. № 11
- Раткин Л. С.** К вопросу об интеграции академической и вузовской науки в нанотехнологической сфере. № 12
- Раткин Л. С.** Новые разработки Российской академии наук в сфере нанотехнологий. № 4
- Селезнев В. А., Принц В. Я., Корнеев И. А.** Чипы с полупроводниковыми трубками-зондами для сканирующей туннельной микроскопии. № 4
- Утенкова С. Б., Мальцев П. П.** О механической прочности массивов углеродных нанотрубок. № 6
- Чернов В. А., Палагушкин А. Н., Прудников Н. В., Сергеев А. П., Сигейкин Г. И., Леонова Е. А.** Изготовление и исследования свойств наноструктур для прямого преобразования ядерной энергии в электрическую с использованием эмиссии вторичных электронов. № 11

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МНСТ

- Абрамов И. И., Баранов А. Л.** Моделирование металлических и полупроводниковых одноэлектронных приборных структур с учетом пространственного квантования на островках. № 3
- Аникин Ю. А., Клосс Ю. Ю., Мартынов Д. В., Черемисин Ф. Г.** Компьютерное моделирование и анализ эксперимента Кнудсена 1910 года. № 8
- Белоус А. И., Гасенкова И. В., Дрозд С. Е., Коннов Е. В., Мухуров Н. И., Белоус В. А.** Технологический вариант реализации конструкции БИС-преобразователя емкость — напряжение для микроэлектромеханических датчиков. № 8
- Беляева А. О., Солнцев В. А.** Моделирование диффузионных процессов через барьерное покрытие в полупроводниковые ветви термоэлектрических модулей. № 1
- Гирфанова Н. А.** Обзор и сравнительная характеристика методов определения качества изображения в пассивных системах автофокусировки. № 4
- Гридчин В. А., Лобач О. В., Дикарева Р. П.** Численное моделирование микроэлектронного сенсора теплового потока. № 4
- Егоров В. В.** Вопросы моделирования многомерных нано- и микроструктур. № 1
- Иванников Д. И.** Теоретическое обоснование применения теории распознавания образов при конструировании химических мембран. № 5
- Клосс Ю. Ю., Рогозин О. А., Черемисин Ф. Г.** Компьютерное моделирование многоступенчатого микронасоса Кнудсена в плоской геометрии. № 6
- Матюшкин И. В.** Методика компарации способов коррекции оптических эффектов близости при формировании топологии на фоторезисте. № 12
- Митько В. Н., Панич А. А., Мотин Д. В., Панич А. Е., Крамаров Ю. А.** Моделирование датчика вибраций на сдвиге пьезоэффекте. № 11
- Мустафаев Г. А., Мустафаев Аб. Г., Мустафаев Ар. Г.** Влияние конструкции на характеристики субмикронных КНИ МОП-транзисторов. № 7
- Мухуров Н. И., Ефремов Г. И., Жвавий С. П.** Конструктивные варианты электростатических торсионных микросканеров с оптимизированными функциональными параметрами. № 1
- Непомнящий О. В., Алекминский С. Ю.** Проблемы верификации проекта при сквозном проектировании вычислительных систем-на-кристалле. № 9
- Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Корнеев И. В.** Моделирование и исследование негатрона с передаточной N-образной вольт-амперной характеристикой. № 4
- Павлов С. В.** Модель фазовых переходов в тонкой эпитаксиальной пленке сегнетоэлектрика на подложке. № 3
- Соловьев В. В.** Модель прецизионной обработки твердых хрупких кристаллических материалов

с получением нанометрового рельефа поверхности. № 12

Спирин В. Г. Математическая модель сопротивления тонкопленочного резистора. № 5

Тарнавский Г. А. Легирование наноконн рельефа поверхности пластины кремния. № 6

Теплова Т. Б., Гридин О. М., Соловьев В. В., Ашкинази Е. Е., Ральченко В. Г. Моделирование процесса квазипластичной поверхностной обработки твердых хрупких материалов электронной техники. № 11

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Аверин И. А., Аношкин Ю. В., Печерская Р. М. Исследование поверхностей слоев резистивных структур на низкоразмерном уровне. № 1

Агасиев А. А., Ахундов Ч. Г., Мамедов М. З., Сармасов С. Н., Мамедов Г. М. Наноструктурные и морфологические свойства пленок SrTiO_3 . № 4

Ануфриев Ю. В., Зенова Е. В., Кондратьев П. К., Рачников Д. А. Технологический маршрут изготовления наноразмерных ячеек энергонезависимой памяти на фазовых переходах с применением двухлучевой установки NOVANANOLAB 600. № 11

Афанасьев М. С., Митягин А. Ю., Чучева Г. В., Косарев С. А., Колодяжный И. Ю. Технология изготовления аккумуляторов водорода на основе углеродных пленок, легированных фтором. № 7

Афонин С. М. Абсолютная устойчивость системы управления деформацией электроупругого преобразователя нано- и микроперемещений. № 5

Бабаевский П. Г., Жуков А. А., Корпухин А. С., Резниченко Г. М. Деформационно-прочностные свойства модифицированных полиимид-кремниевых упруго-шарнирных микроструктур. № 7

Богинская И. А., Гусев А. В., Маилян К. А., Мешков А. С., Пибалк А. В., Рыжиков И. А., Чвалун С. Н. Полимерные пленки на основе поли-п-ксилилена для применения в микро- и оптоэлектронике. № 5

Бокарев В. П., Горнев Е. С. Применение контактной литографии в процессах переноса субмикрометрового изображения при изготовлении МЭМС и ПАВ-устройств. № 7

Вареник Ю. А., Печерская Р. М. Формирование тестового воздействия для измерения вольт-фарадных характеристик. № 6

Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Коротчаев А. Г., Григорьев Д. В., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А. Радиационные эффекты в кристаллах теллурида кадмия—ртути. № 6

Глухова О. Е., Слепченков М. М. Электронные и упругие свойства графана — нового материала электроники: квантово-химическое и эмпирическое исследования. № 8

Гринькин Е. А., Бабаевский П. Г., Жукова С. А., Жуков А. А., Обижаев Д. Ю. Влияние энергетиче-

ческих и геометрических параметров поверхности полиимида с регулярным микрорельефом на анизотропию сидячей капли воды, анизотропию и гистерезис краевого угла смачивания. № 4

Джангуразов Б. Ж., Козлов Г. В., Микитаев А. К. Физический смысл "эффективной частицы" органоглины в полимерных нанокompозитах. № 5

Еганова Е. М. Электропроводность стеклообразных пленок As_2Se_3 . № 11

Еганова Е. М., Воронков Э. Н. Электрические свойства халькогенидных пленок, содержащих наночастицы золота. № 12

Журавлева Л. М., Плеханов В. Г. Изотопическая нанотехнология низкоразмерных структур. № 9

Козырев А. А., Горин Д. А., Кособудский И. Д., Микаелян Г. Т. Перспективы использования полимерных и нанокompозитных материалов в твердотельной электронике. № 3

Коростелев В. Ф., Хромова Л. П. Исследование межатомных взаимодействий с использованием данных об изменениях физико-механических свойств сплавов. № 2

Котова Н. М., Подгорный Ю. В., Серегин Д. С., Воротилов К. А., Сигов А. С. Влияние методики приготовления пленкообразующих растворов на электрофизические свойства сегнетоэлектрических пленок ЦТС. № 10

Кузьмин А. А., Коваленко А. Г., Ковтонюк С. А. Технология изготовления интегральных сверхпроводниковых болометров терагерцового диапазона частот. № 10

Малышев А. В. Особенности поляризационных свойств литий-титановой ферритовой керамики. № 8

Мишина Е. Д., Сигов А. С., Казанцева Е. В., Мухортов В. М. Возбуждение колебаний поляризации при прохождении электрического импульса в тонкой сегнетоэлектрической пленке. № 7

Непчатенко В. А., Розумнюк В. Т., Непчатенко И. А. Предельная фазовая граница при структурном фазовом переходе второго рода. № 5

Петров В. В., Назарова Т. Н., Копылова Н. Ф., Заблуда О. В., Кисилев И., Брунс М. Исследование физико-химических и электрофизических свойств, газочувствительных характеристик нанокompозитных пленок состава $\text{SiO}_2\text{—SnO}_x\text{—CuO}_y$. № 8

Рембеза С. И., Кошелева Н. Н., Рембеза Е. С., Бусллов В. А. Газовая чувствительность пленок-композитов на основе SnO_2 , поверхностно-легированных платиной. № 12

Самойлович М. И., Чернега Н. В., Кудрявцева А. Д., Белянин А. Ф., Клещева С. М. Опаловые матрицы как метаматериал: оптико-акустические эффекты в решетчатых упаковках. № 5

Серегин Д. С. Влияние температуры кристаллизации на электрофизические свойства пленок ЦТС. № 7

Слепцов В. В., Тягинский А. Ю., Артюхов С. А., Церулев М. В. Определение концентрации металлов в наноструктурированных жидких средах

- лазерно-оптическим методом. Часть 1. Эмпирические формулы. № 3
- Слепцов В. В., Тянгинский А. Ю., Артюхов С. А., Церулев М. В.** Определение концентрации металлов в наноструктурированных жидких средах лазерно-оптическим методом. Часть 2. Нечеткое моделирование. № 4
- Смолин В. К.** Использование жидкого азота в процессах формирования элементов микроэлектронных структур. № 4
- Тарнавский Г. А.** Имплантация легирующих примесей в подложку кремния с непланарной поверхностью. № 1
- Шауцуков А. Г., Хатукаев Х. М.** Применение процессов ионного легирования в технологии двухпролетных лавинопролетных диодов с плоским и ступенчатым профилем легирования. № 9
- Штенников В. Н.** Влияние длины паяльного стержня на температуру контактной пайки. № 3
- Штенников В. Н.** Методика обеспечения требуемой температуры контактной пайки. № 7
- Штенников В. Н.** Проблемы и перспективы использования бессвинцовых материалов в военной и космической технике. № 8
- Штенников В. Н.** Производительность печи и число зон нагрева. № 10
- Штенников В. Н.** Уточняем международный стандарт МЭК. № 2
- ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ**
- Абрамов И. И.** Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. VIII. Нанотранзисторы с МДП-структурой. № 9—11
- Амеличев В. В., Гамарц И. А., Касаткин С. И., Лопатин В. В., Муравьев А. М., Плотникова Н. В., Резнев А. А., Решетников И. А., Чаплыгин Ю. А.** Анизотропные магниторезистивные преобразователи на основе ферромагнитных наноструктур с различным содержанием кобальта. № 2
- Белкин М. Е., Белкин Л. М.** Исследование характеристики времени задержки включения поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором. № 11
- Белозубов Е. М.** Тонкопленочные емкостные микроэлектромеханические системы с монокристаллическим диэлектриком. № 4
- Бобров А. А., Дюжев Н. А., Медников А. М., Махиборода М. А., Попков А. Ф., Шкурпат И. Г., Матвеева Н. К.** Исследование выходного отклика резистивного анемометрического преобразователя расхода газа мембранного типа в стационарном и импульсном режимах нагрева. № 9
- Бобров А. А., Попков А. Ф., Дюжев Н. А., Кулагин Н. Е., Махиборода М. А., Медников А. М.** Расчет терморезистивного анемометрического преобразователя на мембране. № 8
- Боронахин А. М., Иванов П. А., Суров И. Л.** Исследование погрешностей триады микромеханических гироскопов с использованием малогабаритного двухосного стенда. № 1
- Боронахин А. М., Иванов П. А., Суров И. Л.** Коррекция влияния линейного ускорения на показания микромеханического гироскопа № 7 Боронахин А. М., Подгорная Л. Н. Применение микромеханических датчиков для диагностики рельсового пути. № 8
- Бохов О. С., Бройко А. П., Корляков А. В., Лучинин В. В.** Микросенсор для контроля остаточного давления на основе периодического теплового режима. № 2
- Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Коротаев А. Г., Григорьев Д. В.** Влияние облучения на характеристики фотодетекторов из HgCdTe. № 9
- Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Коротаев А. Г., Григорьев Д. В., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А.** Влияние облучения на характеристики приборов с накоплением заряда. № 7
- Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А.** Детекторы с квантовыми точками Ge/Si для инфракрасного диапазона. № 4
- Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А.** Тенденции развития инфракрасных детекторов с квантовыми точками. № 3
- Вопилкин Е. А., Чеченин Ю. И., Савицкая Л. Н., Бронникова Н. Г., Шашкин В. И.** Переменный МЭМС-конденсатор с электростатическим управлением. № 12
- Воронин А. И., Осипков А. С., Горбатовская Т. А.** Механическая прочность ветвей термоэлементов на основе Bi_2Te_3 при различных методах их получения. № 2
- Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Барулина М. А.** Теоретические основы разработки и создания суперминиатюрного микромеханического многофункционального датчика инерциальной информации. № 5
- Драгунов В. П., Остертак Д. И.** Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Часть I. Расчет емкостей. № 7
- Драгунов В. П., Остертак Д. И.** Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Часть II. Расчет электростатических сил. № 8
- Драгунов В. П., Остертак Д. И.** Электростатический микроэлектромеханический преобразователь с последовательной схемой включения компонентов. № 6
- Ехменина И. В., Шешин Е. П., Чадаев Н. Н.** Источники излучения на основе наноструктурированных автокатодов. № 4
- Ехменина И. В., Шешин Е. П., Чадаев Н. Н.** Проблемы создания ультрафиолетовых источников на основе наноструктурированных автоэмиссионных катодов. № 2

Зайцев А. А. Развитие схемотехники фильтра контура управления для интегральных быстродействующих устройств автоматического фазирования сигналов. № 10

Зайцев Н. А., Матюшкин И. В. Особенности формирования подзатворной системы наноприборов. № 2

Игнатъева Е. В., Михайлов Ю. А., Тимошенко С. П. О проектировании мембраны с жестким центром кристаллов кремниевых тензопреобразователей на давления от 0,025 до 25 МПа. № 2

Козлов Д. В., Смирнов И. П., Корпухин А. С., Жуков А. А., Бабаевский П. Г., Сухоруков А. Г. Оценка влияния многоциклового изгиба на термомодеформационные характеристики упруго-шарнирных балок тепловых микроактюаторов. № 12

Кондрашин А. А., Слепцов В. В., Лямин А. Н. OLED/PLED — передовые технологии освещения. № 11

Косцов Э. Г., Соколов А. А. Микроэлектромеханические инжекторы топлива для дизельных двигателей. № 8

Лучинин В. В., Усикова М. А. Процессы препарирования при реинжиниринге изделий микротехники. № 3

Масальский Н. В. Синтез характеристик логических вентилях на двухзатворных суб-25-нанометровых КНИ КМОП-транзисторах для маломощных применений. № 5

Митько В. Н., Панич А. А., Мотин Д. В., Панич А. Е., Крамаров Ю. А. Вычисление чувствительности балочного пьезогироскопа. № 10

Михайлов В. П., Базиненков А. М., Кузнецов А. С., Зобов И. К., Шаков К. Г. Системы реологического типа для микро- и нанопозиционирования и виброизоляции. № 7

Мокров Е. А., Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е. Тонкопленочные емкостные микроэлектромеханические системы с деформируемым диэлектриком. № 2

Негров Д. В., Лейченко А. С., Шешин Е. П. Элемент дисплейной матрицы на основе автоэмиссионного катода из терморасширенного графита. № 7

Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Корнеев И. В., Родионов В. А. Двухполюсный позиционно-чувствительный фотодатчик с отрицательной дифференциальной проводимостью. № 12

Пивоненков Б. И. Новый класс пьезорезистивных микро- и наносенсоров. № 9

Пивоненков Б. И. Критерий качества сенсоров механических величин. № 10

Пивоненков Б. И., Школьников В. М. Трехкомпонентный пьезорезистивный МЭМ-акселерометр. № 11

Пивоненков Б. И., Школьников В. М. Одно- и трехкомпонентные пьезорезистивные акселерометры с воздушным демпфированием. № 1

Распопов В. Я., Иванов Ю. В., Малютин Д. М., Алалуев Р. В., Погорелов М. Г., Шведов А. П., Лихошерст В. В., Товкач С. Е. Информационно-измерительные микросистемы для подвижных объектов. № 1

Распопов В. Я., Матвеев В. В., Лихошерст В. В., Алалуев Р. В., Иванов Ю. В., Шведов А. П., Серегин С. И. Информационно-измерительные системы ориентации на микромеханических чувствительных элементах для вращающихся по кривую летательных аппаратов. № 12

Смолин В. К. Тонкопленочные резистивные элементы первичных преобразователей датчиков. № 9

Тимошенко С. П., Калугин В. В., Шалимов А. С., Анчутин С. А., Морозова Е. С. Двухканальный емкостной преобразователь ускорений. № 1

Тихонов Р. Д. Латеральные и планарные биполярные магнитотранзисторы. № 6

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

Агафонов В. М., Криштоп В. Г., Сафонов М. В. Измерительные устройства на основе молекулярно-электронного переноса в микро- и наноструктурах. № 6

Потапов А. А. Расчет прочности связи гомоядерных молекул, образуемых атомами I группы таблицы Д. И. Менделеева. № 1

Потапов А. А. Расчет прочности связи простых гидридов элементов таблицы Д. И. Менделеева. № 2

Рзянина А. В., Усанов А. Д., Скрипаль Ан. В., Усанов Д. А. Действие углеродных нанотрубок на клетки млекопитающих при центрифугировании. № 6

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Григорьев Д. В. Экономика солнечной энергетики. № 12

Егоров В. В. Измерение сдвига в нано- и микро-структурированных средах. № 3

Ершова Е. В., Овакимян К. Г., Свергун О. А. Гибкие солнечные батареи. № 12

Ершова Е. В., Овакимян К. Г., Григорьев Д. В. Твердотельные солнечные батареи. № 12

Овакимян К. Г., Андриянов С. В. Аэростатные солнечные электростанции. № 12

Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Добдин С. Ю. Определение ускорения при неравномерно ускоренных микро- и наносмещениях объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера. № 10

СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ

Губарев В. А., Воронков С. О. Системное моделирование устройства для реализации в СБИС СнК с применением программы-анализатора алгоритмов. № 2

- Rathkeen L. S.** *About the Integration of Academician and University Science in Nanotechnological Sphere* . . . 2
 In 2010 Russian academy of science (RAS) and Ministry of education and science of Russian Federation organized international forums, symposiums, conferences and scientific and practical seminars, in which were discussed the questions of integration of academician and university science in nanotechnological sphere. One the main problem is the law aspect, connecting with the intellectual property of common research in the institutes of Russian academy of science and Russian universities.
Keywords: RAS, nanotechnologies, integration, university
- Matyushkin I. V.** *The Comparison Routine for a Methods of Optical Proximity Correction at Layout Figures Formation on Photoresist*. 5
 Based on CAD Synopsys and MATLAB comparison routine for OPC methods is developed. Related with contour metrics and took into consideration the interactive graph features of comparator, math description of comparison procedure is given. Base matrix method for comparison execution is proposed.
Keywords: layout, OPC, computer vision, CAD, metric
- Solovjev V. V.** *The Model of Precision Surface Processing of Solid Brittle Crystalline Material with Reception Nanometers a Relief of Surface*. 10
 Diamonds and other diamond-like hard materials are finding an increasing application in industry. Monocrystals of the lime sapphire, thanks to the properties, find wide application by manufacture of hi-tech products in the field of nanotechnologies. Surface roughness of substrate is an important parameter, when manufacturing high-frequency instruments. Presence of dislocations and microcracks results in developing of defects in epitaxial layers and decreases performance attributes of microschemes. For manufacturing of the specified products it is necessary precision processing of a surface with reception nanometers a relief. Traditional processing represents the difficult technological scheme with finishing polishing in excited environments. The perspective method of quasiplastic processing allows to receive a high-quality surface at a stage of diamond grinding.
Keywords: leikosapphire (lime sapphire), microelectronics, quasiplastic grinding, base layers, roughness
- Eganova E. M., Voronkov E. N.** *The Electrical Properties of Chalcogenide Films Containing Gold Nanoparticles* 15
 The aim of this work was to study the electrical characteristics of the films As_2Se_3 , containing nanoparticles of gold. Experiments preceded by a preliminary calculation of the dependence of electrical conductivity on volume fraction of nanoparticles on the basis of standard models used for composite materials. After the experiments were performed to compare experimental data with calculations. It found significant differences that indicate the interaction of the structural matrix with embedded nanoparticles.
Keywords: CGS, nanoparticles, gold, electrical conductivity
- Rembeza S. I., Kosheleva N. N., Rembeza E. S., Buslov V. A.** *Gas Sensitivity of Film Composites on the Base of SnO_2 Surface Doped with Platinum* 17
 Measurement data of gas sensitivity for film composite on the base of tin dioxide with silicon additive surface doped with platinum are reported. It was determined that surface doped film composites have good sensitivity to redox-gases and allow to decrease temperature of maximal gas sensitivity.
Keywords: tin dioxide films, surface doping with platinum, gas sensitivity
- Kozlov D. V. Smirnov I. P., Korpuhin A. S., Zhukov A. A., Babaevsky P. G., Suhorukov A. G.** *Estimation of Multicycle Bending Effect on Thermal Actuator* 22
 Method is offered and estimation of multicycle bending effect on thermodeformation characteristics of thermal actuator elastic-hinge beams after assign number of loading cycles was carried out. It was shown, that functional thermodeformation angles during heating after 5×10^6 bending cycles decreased approximately on 15 % and after $3,2 \times 10^7$ cycles — on 25 %. Method and results obtained gave the opportunity to estimate durability and performance stability of the actuators during operation and aging effect on their performance characteristics.
Keywords: thermal microactuators, elastic-hinge beams, polyimide, silicon, multicycle bending, initial and functional deformations
- Raspopov V. Ya., Matveev V. V., Lihosherst V. V., Alaluev R. V., Ivanov Yu. V., Shvedov A. P., Seregin S. I.** *Informational-Measurement Attitude Control Systems on Micromechanical Sensing Probes for Flight Vehicles Rotating on the Roll* 26
 In work is probed possibility of using micromechanical gyros and accelerometers onboard unmanned airborne vehicle rotating on a roll. Algorithm of obtaining measurement information for the solution problems of stabilisation and control by the airborne vehicle rotating on a roll is offered.
Keywords: micromechanical sensors, missile, strapdown inertial navigational systems, oblique measurement basis

- Vopilkin E. A., Chechenin Yu. I., Savitskaya L. N., Bronnikova N. G. Shashkin V. I. MEMS — Electrostatic Actuated Variable Capacitor.** 30
 A microelectromechanical system (MEMS) on GaAs substrate consisting of movable 1.5 μm thick golden membrane with dimensions $100 \times 100 \mu\text{m}$ is fabricated. The membrane is electrostatic actuated. Static electrical and resonant mechanical properties of the device are investigated. A possibility of application of this system as capacitive accelerometer, Coulomb drive and varactor is estimated.
Keywords: MEMS, varactor Coulomb drive, accelerometer
- Novikov S. G., Gurin N. T., Korneev I. V., Rodionov V. A. Bipolar Position-Sensitive Photosensor with a Negative Differential Conductivity.** 35
 This work deals with the bipolar position-sensitive photo sensor with a negative differential conductivity (NDC). Photosensor is an analog composite device, implemented on the basis of bipolar-field element with the NDC and a semiconductor position-sensitive photodetector. A special feature of the photocell is the appearance of land NDC on the output current-voltage characteristics in a two-electrode switch during illumination of photosensitive area and the dependence of the values of the EIR coordinates of the center of the beam on the surface of the photocell. Examined above pole position-sensitive photosensor with the EIR can be used in different nodes of mechatronics, microsystems technology, automation, control devices and positioning.
Keywords: position-sensitive photo sensor, the device with negative differential conductivity
- Ovakimyan K. G., Andriyanov S. V. Aerostatic Solar Power Plants** 39
 In this article are listed technological and economical perspectives of potential high-effective alternative energy element. This new element is based on the concept of aerostatic solar energy systems. Also this article describes possible solutions of the basic problems of modern solar energy.
Keywords: Solar energy, aerostatic platforms, project Gelios, ASES, nanomaterials
- Ershova E. V., Ovakimyan K. G., Grigoriev D. V. Solid-State Solar Batteries** 41
 In this article the best results in Russia on highly effective transformation of energy of the sun solid-state multi epitaxial by semi-conductor elements are mentioned. The efficiency of such batteries stably exceeds 35 % and ways of its increase are visible. In work the structure of a photo cell and a design of solar cells, quality assurance also conclusions and prospects of development of solar modules are considered also.
Keywords: solid-state solar batteries, semi-conductors, concentrators, Fresnel lens
- Ershova E. V., Ovakimyan K. G., Svergun O. A. Soft Solar Batteries.** 45
 This article is about different kind of solar batteries and ways of its manufacturing. In the text below listed the results of solar cell production experiments used with organic-semiconducting materials, and given conclusions about it's efficiency and disadvantages.
Keywords: solar energy, photovoltaic solar cells, soft organic solar batteries, organic semiconductive materials, solar cells manufacturing, hight-efficiently organic solar batteries
- Grigoriev D. V. Economy of Solar Energy** 49
 This article has economic character. In it key players of the market of solar converters are shown, and also the forecast for change of the price of the energy received from the sun is given. Article is written by graduate National Research Nuclear University MPhI.
Keywords: energy sector, alternative energy, semiconductors, European Photovoltaic Industry Association, sun powers

For foreign subscribers:

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

*The journal bought since november 1999.
 Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev
 ISSN 1813-8586.*

**Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(499) 269-5510.
 E-mail: nmst@novtex.ru; http://www.microsystems.ru**

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru
 Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства
 в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
 Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т. Н. Погорелова. Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор

Сдано в набор 18.10.2010. Подписано в печать 17.11.2010. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
 Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,33. Заказ 950. Цена договорная

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