

# Известия высших учебных заведений

## ЭЛЕКТРОНИКА 6'2005

*Научно-технический журнал*

*Издается с 1996 г.*

**Выходит 6 раз в год**

### СОДЕРЖАНИЕ

22 Центральному научно-исследовательскому испытательному институту Министерства обороны Российской Федерации — 50 лет ..... 4

*Телец В.А., Негина Ю.С., Орлов А.А.* Направления, базовые составляющие и условия развития микросистемной техники специального назначения ..... 9

#### Материалы электронной техники

*Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Булах И.И., Серов М.М.* Неоднородность упругих свойств поликристаллических лент алюминия ..... 21

*Батюня Л.П.* Управление свойствами оксидных многокомпонентных материалов с использованием модифицирующих элементов ..... 28

*Соловей В.В., Литвинов Ю.М.* Диагностика субмикронных приповерхностных повреждений в пластинах кремния после двухстороннего химико-механического полирования ..... 32

#### Технология микроэлектроники

*Грушевский А.М., Семенов С.Н., Жуков П.А., Карвасарный В.В.* Технология прецизионного монтажа на полиимидных платах ..... 36

*Сенокосов Э.А., Макаревич А.Л., Сорочан В.В.* Исследование механизма переключения в слоях  $n\text{-CdTe:In}$  ..... 41

*Бархоткин В.А., Райнова Ю.П., Терентьев А.И., Райнов А.Ю.* Алгоритм управления температурным режимом в быстрых термических процессах ..... 46

*Крупкина Т.Ю.* Структура и основные элементы системы виртуального производства ..... 52



#### Учредители:

Министерство  
образования и науки  
Российской Федерации

Московский  
государственный институт  
электронной техники  
(технический университет)

Главный редактор  
**В.Д.Вернер**

#### Редакционная коллегия:

*Бархоткин В.А.*  
*Быков Д.В.*  
*Грибов Б.Г.*  
*Казённых Г.Г.*  
*Коноплёв Б.Г.*  
*Копеев Ю.В.*  
*Коркишко Ю.Н.*  
*Королёв М.А.*  
*Кубарев Ю.В.*  
*Неволин В.К.*  
*Неволин В.Н.*  
*Петросянец К.О.*  
*Преснухин Л.Н.*  
*Руденко А.А.*  
*Таиров Ю.М.*  
*Телец В.А.*  
*Тихонов А.Н.*  
*Усанов Д.А.*  
*Чаплыгин Ю.А.* (зам. главного редактора)

Адрес редакции: 124498,  
Москва, Зеленоград,  
проезд 4806, д. 5, МИЭТ  
Тел. (095) 534-6205  
Факс (095) 530-5429  
E-mail: magazine@rnd.miee.ru  
<http://www.miet.ru>

## Микроэлектроника и полупроводниковые приборы

*Чаплыгин Ю.А., Галушков А.И., Семёнов А.А., Усанов Д.А.*

Магнитоуправляемый диностор ..... 56

## Схемотехника и проектирование

*Соловьев Р.А., Глебов А.Л., Гаврилов С.В.* Анализ помех, влияющих на задержку прохождения сигнала в цифровых СБИС, на основе логических ограничений ..... 61

## Микропроцессорная техника

*Широ Г.Э., Романов С.П.* Алгоритм синтеза радиолокационных изображений для малых углов переднебокового обзора ..... 69

*Кочетков В.Ю., Переверзев А.Л., Савченко Ю.В.* Первичная обработка управляющих сигналов с время-импульсной модуляцией в условиях наличия комбинированной помехи ..... 75

*Бурдинский И.Н., Миронов А.С.* Применение технологии «конфигурируемые системы на кристалле» для исследования рабочих режимов автомобильных двигателей внутреннего сгорания ..... 79

## Методы и техника измерений

*Булярский С.В., Басаев А.С., Суханов В.С.* Температурные зависимости коэффициентов захвата глубоких центров в рентгеночувствительных приемниках излучения ..... 84

*Горлов М.И., Смирнов Д.Ю., Сегал Ю.Е., Емельянов А.В.* Использование уровня шумов для контроля полупроводниковых изделий при термоциклировании ..... 89

## Краткие сообщения

*Тафинцев К.С.* Увеличение динамического диапазона сигма-дельта АЦП методом тройной выборки внутреннего многоуровневого ЦАП ..... 93

*Спирин В.Г.* Исследование конструктивной погрешности сопротивления тонкопленочного резистора ..... 95

*Батюня Л.П.* Метод синтеза особоличистых многокомпонентных оксидных порошков ..... 97

## Юбилей

Валиеву Камилу Ахметовичу – 75 лет ..... 99

## Конференции

2-я Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, технике и образовании» ..... 31

Contents ..... 102

Abstracts ..... 103

Тематический указатель статей, опубликованных в 2005 году ..... 106

К сведению авторов ..... 111

Заведующая редакцией  
*С.Г.Зверева*

Редактор  
*А.В.Тихонова*

Научный редактор  
*С.Г.Зверева*

Художественный редактор  
*А.В.Тихонова*

Корректор  
*Л.Ф.Летунова*

Технический редактор  
*Л.Г.Лосякова*

Компьютерный дизайн, верстка  
*М.В.Гергель*  
*А.А.Григорашвили*  
*С.Ю.Рыжков*

Подписано в печать 02.12.05  
Формат бумаги 60х84 1/8.  
Печать офсетная  
Объем 13,02 усл.печ.л.,  
12,0 уч.-изд.л.  
Заказ № 262.

Отпечатано  
в типографии ИПК МИЭТ  
124498, Москва, Зеленоград,  
проезд 4806, д. 5, МИЭТ

Свидетельство о регистрации  
№ 014134  
выдано Комитетом РФ по печати  
12.10.95.

Включен в Перечень периодических научных изданий, рекомендуемых для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание докторских диссертаций:  
Бюллетень ВАК Министерства образования РФ, 2002, № 1.



## Уважаемый читатель!

Исполнилось 50 лет 22 Центральному научно-исследовательскому испытательному институту Министерства обороны Российской Федерации (22 ЦНИИИ Минобороны России).

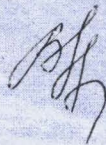
За полвека 22 ЦНИИИ Минобороны России стал одной из ведущих исследовательских и испытательных организаций Минобороны и страны, результаты деятельности которой оказали решающее влияние на развитие и применение в вооружении и военной технике изделий отечественной электронной техники и электротехники. Авторитет 22 ЦНИИИ Минобороны России в этих областях исследований весьма высок. За годы, прошедшие со времени создания института, в нем сформирован и сосредоточен большой научный потенциал, уникальная лабораторная испытательная база.

В 1997 году в Московском институте радиотехники, электроники и автоматики (техническом университете) на базе 22 ЦНИИИ Минобороны России создана и успешно функционирует базовая кафедра «Материалы и изделия радиоэлектроники военного назначения». В Московском государственном университете леса с помощью научного и преподавательского состава 22 ЦНИИИ Минобороны России организован филиал кафедры «Электронные приборы и микропроцессорная техника».

Краткая статья заместителя начальника 22 ЦНИИИ Минобороны России по научной работе, доктора технических наук, профессора, лауреата премии Правительства Российской Федерации Тельца В.А. позволит читателям журнала познакомиться с историей института и направлениями его деятельности в настоящее время.

Я надеюсь, что информация о ведущих российских вузах и научно-исследовательских организациях, работающих в области электроники, так же как и текущие публикации по разделам нашего журнала, будут полезны читателям.

Главный редактор журнала  
доктор физ.-мат. наук,  
профессор



В.Д. Вернер





## **22 Центральному научно-исследовательскому испытательному институту Министерства обороны Российской Федерации – 50 лет**

22 Центральный научно-исследовательский испытательный институт Министерства обороны Российской Федерации (22 ЦНИИИ Минобороны России) был создан в соответствии с Постановлением Совета Министров СССР от 1 февраля 1955 года № 156-91 о возложении на Министерство обороны СССР задач по разработке сводных планов НИОКР по созданию элементов радиотехнической и электронной аппаратуры, межведомственных нормалей на них, полуфабрикатов и материалов для радиоэлектронной аппаратуры, а также по изучению опыта эксплуатации, проведения контрольной проверки режимов работы и проведения государственных испытаний новых изделий радиоэлектроники.

Во исполнение Постановления Правительства Министр обороны СССР Маршал Советского Союза Жуков Г.К. издал приказ от 27 апреля 1955 года о создании Центрального научно-исследовательского испытательного института Министерства обороны № 22 на базе Центральной лаборатории электровакуумных приборов, образованной в 1951 году в Министерстве обороны в качестве научного центра по сбору, анализу и исследованию причин отказов радиоэлектронных средств вооружения и военной техники (РЭС ВВТ).

Начало функционирования института – июнь 1955 года. В организации института и его становлении деятельное участие принимал академик адмирал Берг А.И. Первым начальником института стал генерал-майор войск связи Алешин С.И., заместителем по научной работе – полковник Морозов И.И.

На институт возлагалась головная роль в части разработки и реализации военно-технических основ единой, целенаправленной научно-технической политики в области развития и применения изделий военной электроники и электротехники в интересах всех видов Вооруженных Сил, родов войск, создания и реализации системы управления развитием и применением изделий электронной техники и электротехники военного назначения, охватывающей все этапы их жизненного цикла.

Областями научных исследований института стали прогноз развития, отработка требований Минобороны к важнейшим классам изделий электроники и электротехники, проведение государственных испытаний и формирование ограничительных перечней этих изделий, их подконтрольная эксплуатация в РЭС ВВТ, контрольно-выборочные испытания, анализ и выявление ненадежных элементов и отработка предложений по повышению их качества и надежности, выработка предложений по продлению ресурса изделий, снятию изделий с производства и др.

В конце 60-х и в начале 70-х годов прошлого столетия взят курс на широко-масштабное развитие военной радиоэлектроники. В начале пути в сферу исследований института были включены изделия электровакуумной электроники СВЧ-диапазона для аппаратуры связи и радиолокации. С совершенствованием организации института существенно расширилась и номенклатура сопровождаемых изделий, которая, кроме того, стала включать радиодетали, кабели, изделия электроники, радиоизмерительные приборы и др.



С появлением новых технологий и классов изделий (полупроводниковых приборов, микродвигателей, лазеров, микросхем и др.), их внедрением в РЭС ВВТ акцент в исследованиях института сместился на изучение эксплуатационных свойств и характеристик изделий квантовой, полупроводниковой электроники и микроэлектроники и др., выработки технических требований к составу их параметров, показателей качества и надежности.

За прошедшие годы институт выступил инициатором развертывания исследований более чем в 30 научных направлениях, включая комплексную миниатюризацию РЭС ВВТ, развитие и унификацию средств вычислительной техники бортовых систем, радиационную и электромагнитную стойкость электронных компонентов и РЭС ВВТ, надежность-ориентированное проектирование РЭС ВВТ, развитие и испытания тепловизионных приборов и приборов ночного видения, систем и средств электроэнергетики, государственного опознавания и др.

Институт явился инициатором планирования развития компонентной базы радиоэлектроники посредством комплексно-целевых и аппаратно-ориентированных программ, итогами выполнения которых и в настоящее время обеспечивается серийное производство, модернизация и создание новых образцов, систем и комплексов РЭС ВВТ.

Принципиально новые направления исследований института появились на этапе создания отечественной электронной промышленностью интегральных микросхем и целевого перевода в микроэлектронное исполнение РЭС наземных, морских, авиационных, ракетно-космических и других видов ВВТ. География предприятий электронной промышленности была обширной и представлена столицами всех союзных республик, а также городами Ленинград, Брянск, Воронеж, Новосибирск, Калуга, Пенза, Павловский Посад и др.

Технические решения, предложенные институтом, послужили основой для разработки принципиально новых сверхбольших интегральных микросхем с архитектурой «однородная вычислительная среда» и первого отечественного нейропроцессора, параметры которых соответствовали лучшим мировым достижениям.

Разработанные сотрудниками института методы пересчета тактико-технических характеристик тепловизионных приборов для задания требований к параметрам многоэлементных приемников инфракрасного диапазона спектра являются патентночистыми и широко используются предприятиями промышленности и военными представительствами в качестве эффективного «инструмента» при определении качества и технических характеристик готовой продукции.



**Телец Виталий Арсеньевич** – заместитель начальника 22 ЦНИИИ Минобороны России по научной работе, доктор технических наук, профессор, лауреат премии Правительства Российской Федерации. С 1977 года после окончания Киевского высшего военного инженерного училища связи им. М.И. Калинина проходит службу в 22 ЦНИИИ Минобороны России на различных научных должностях, начиная с младшего научного сотрудника. Автор более 180 научных трудов и публикаций, в том числе 11 книг и учебных пособий, 8 внедренных изобретений.

*Область научных интересов:* микроэлектроника и микросистемная техника, радиационная стойкость электронной компонентной базы, стандартизация, сертификация систем качества.

Правильность выбора типов комплекствующих изделий при создании РЭС ВВТ, управление их минимально-необходимой и функционально-полной номенклатурой, планирование серийных заказов во многом базируется на разрабатываемых и оперативно обновляемых «Перечнях изделий, разрешенных к применению...» и Каталогах предметов снабжения Вооруженных Сил, имеющих ключевое значение в проведении военно-технической политики Минобороны. Методология построения и актуализации «Перечней...» разработана в институте и продолжает совершенствоваться до настоящего времени.

Исследования в области имитационных методов испытаний на спецстойкость обеспечили на новом этапе технологического и функционального развития изделий электронной техники выполнение требований Минобороны с высоким технико-экономическим эффектом и возможностью проведения испытания на комплексные воздействия внешних дестабилизирующих факторов.

Институт признан и остается до настоящего времени лидером среди исследовательских организаций Минобороны и

оборонно-промышленного комплекса (ОПК) по проблеме разработки и обоснования требований к надежности РЭС ВВТ (безотказности, ремонтпригодности, долговечности и сохраняемости), методологии ее обеспечения и контроля.

Важнейшие стратегические комплексы ВВТ, такие как «Тополь-М», С-300, Синева, Булава, Тор и ряд других (всего более 200), были включены в сферу военно-научного сопровождения института.

Разработанные специалистами института методы моделирования и определения работоспособности с учетом деградационных процессов в изделиях квантовой электроники, преобразователях энергии, изделиях СВЧ- и микроэлектроники явились основой для развития теории и практики обеспечения и контроля надежности РЭС ВВТ, в том числе и для объектов длительного активного функционирования.

В институте сохранена, продолжает функционировать и развиваться единственная в стране система сбора анализа и обработки информации в виде целевой базы данных о надежности и отказах электронной компонентной базы и РЭС ВВТ на их основе, использующая данные



Сотрудники отдела микроэлектроники  
ФГУП «22 ЦНИИИ Минобороны России»



из сферы их разработки, производства и эксплуатации, в том числе подконтрольной эксплуатации на первых ее этапах после принятия аппаратуры ВВТ на вооружение. Эта информация используется для принятия мер по исключению отказов военной техники и принятия соответствующих технических и управленческих решений в этой области. По методологии, предложенной институтом, продлены сроки эксплуатации комплектующих в более чем 100 важнейших образцах ВВТ, что обеспечило государству экономию в десятки миллионов рублей. В целом по экспертным оценкам экономический эффект от внедрения результатов исследований по проблеме надежности во многом превысил все затраты на содержание государством института в течение 50 лет.

За институтом закреплена координирующая роль в области исследований по проблеме развития систем и средств государственного опознавания объектов ВВТ. Военно-научное сопровождение развития этих средств осуществляется вплоть до их принятия на вооружение, эксплуатации и методического обеспечения применения. В настоящее время разрабатывается новое поколение этих средств на основе использования высокоэффективных методов опознавания и распознавания объектов с высокой степенью защиты от разведки и провоцирования.

Это лишь отдельные примеры направлений и результатов исследований 22 ЦНИИИ Минобороны России.

В институте постоянно развивается испытательная база. Это позволяет проводить исследования и испытания изделий в режимах, близких к эксплуатационным. Научно-исследовательская и экспериментальная база анализа отказов электронных компонентов по-прежнему является уникальной и обеспечивает проведение глубинных исследований причин и характера отказов изделий.

За время своего существования коллективом института выполнено более 2500 научно-исследовательских и испы-

тательных работ в интересах заказывающих управлений Минобороны и ведущих предприятий ОПК страны. Более 300 уникальных научно-технических решений института внедрены в новейшие средства ВВТ. Разработанные и внедренные при головной роли института государственные стандарты вида общих технических требований Минобороны «Мороз» и «Климат» охватывают все этапы жизненного цикла радиоэлектронной продукции. За 50-летний период институтом разработано и внедрено около 16 тысяч стандартов, руководящих технических документов, инструкций по боевому применению систем и комплексов ВВТ, оценке надежности и радиационной стойкости электронной компонентной базы и РЭС ВВТ и др.

Ежегодный экономический эффект от внедрения научных результатов института по оценкам заказчиков составляет сотни миллионов рублей, в том числе за счет оптимизации заявок главных конструкторов на создание новых изделий радиоэлектроники (исключая дублирования заказов, продления сроков эксплуатации РЭС ВВТ и комплектующих), реализации предложений по внедрению расчетных и расчетно-экспериментальных методов испытаний и рационального сокращения дорогостоящих видов испытаний.

В трудные годы экономических реформ и ограниченного финансирования институт сохранил научный потенциал, научную значимость и востребованность его интеллектуальной продукции, укрепил связи с другими организациями и предприятиями Минобороны и ОПК, Академии наук РФ, вузов (всего их более 800).

В настоящее время исходя из реально задаваемых и прогнозируемых задач институт сосредоточил свои усилия на решении таких важнейших научно-технических и прикладных проблем, как:

- развитие и внедрение новейших информационных технологий в создание новых поколений изделий военной электроники, сверхсложных изделий микроэлектроники (сложнофункциональные блоки,

«системы на кристалле»), твердотельным комплексированным изделиям СВЧ, сложным лазерным решеткам, функционально-управляемым изделиям фотоэлектроники, полупроводниковым изделиям мощной и экстремальной электроники и др.;

- развитие и внедрение адаптивных к условиям эксплуатации устройств и систем энергоснабжения ВВТ, обеспечивающих качество электроэнергии и минимизацию масса-габаритных характеристик РЭС ВВТ;

- развитие и внедрение целевой электронной компонентной базы для мобильных, многорежимных и перестраиваемых систем и средств управления оружием, в том числе высокоточным, и войсковыми формированиями на основе принципов микросистемной техники, внедрения роботизированных систем и комплексов, включая использование комплектующих изделий на принципах модульного и магистрально-модульного конструирования, квантово-размерных, микро- и нанотехнологий;

- разработка и научное обоснование принципов унификации новых поколений электронной компонентной базы на основе технической информационной и метрологической совместимости элементов, ее структурного построения и функциональной гибкости;

- разработка и внедрение новых методов обеспечения и оценки надежности электронных компонентов, систем и комплексов вооружения, основанных на создании надежностно-ориентированных программ проектирования, производства и эксплуатации, использовании машинных методов экспертизы технических решений верификации, обеспечения качества и надежности, применения корректирующих воздействий на ранних этапах создания радиоэлектронной продукции;

- развитие системы и средств методов испытаний;

- совершенствование технологий утилизации электронных компонентов и РЭС ВВТ на основе использования комплексного извлечения вторичных продуктов, обеспечения соблюдения требований по

экологии и развития автоматизированной базы утилизации.

Эти и многие другие задачи определены концепцией исследований института на среднесрочный и долгосрочный периоды. Важнейшей задачей института было и остается участие в формировании и военно-научном сопровождении государственного оборонного заказа. Большой объем в исследованиях института занимают проблемы развития систем менеджмента качества военной радиоэлектронной продукции, нормативного обеспечения, сертификации систем качества предприятий-разработчиков и изготовителей электронной компонентной базы на их способность выполнять военные заказы, организации сертификационных испытаний изделий иностранного производства.

В научном коллективе института более 90 докторов и кандидатов наук. С 1996 года в институте функционирует диссертационный совет по защите кандидатских диссертаций, за время существования которого защитились 16 соискателей.

За выдающиеся достижения в области создания военной техники 64 сотрудника института в разное время становились лауреатами престижных премий, в том числе – Ленинской, Государственной, правительственных и др.

Институт награжден орденами Красной Звезды и «Знак Почета».

Постоянное стремление к совершенствованию и дальнейшему развитию новейших методов исследований, эффективном использовании имеющегося научного потенциала позволит институту и в будущем поддерживать высокую репутацию, сохранять заслуженный авторитет среди научно-исследовательских учреждений Минобороны, организаций промышленности, институтов и организаций РАН, высших учебных заведений страны.

**Телец Виталий Арсеньевич,**  
заместитель начальника 22 ЦНИИИ  
Минобороны России по научной работе,  
доктор технических наук



УДК 621.3.049.77.001.2

## **Направления, базовые составляющие и условия развития изделий микросистемной техники специального назначения**

**В.А.Телец, Ю.С.Негина, А.А.Орлов**

**ФГУП «22 ЦНИИ Минобороны России»**

Преведены результаты комплексного анализа микросистемной техники и развития типажа ее изделий как критически важной технологии и основы для дальнейшей микроминиатюризации аппаратуры специальной техники.

Анализ истории конфликтов и катастроф современности показывает, что гарантией эффективности действий в указанных экстремальных условиях является высокий уровень военного, экономического и технологического развития государства. Прорыв в области критически важных технологий и классов изделий коренным образом влияет на облик техники специального назначения [1].

Достижения в области фундаментально-поисковых исследований, материаловедения, субмикронных технологий микроэлектроники, оптики и микромеханики, средств проектирования функционально-сложных электронных устройств сделали возможным разработку и массовое производство техники специального назначения в микроминиатюрном исполнении на основе применения изделий микросистемной техники (МСТ) [2–7].

МСТ – научно-техническое направление, целью которого является создание в объеме или на поверхности твердого тела упорядоченной композиции областей с заданным составом, структурой и геометрией, статическая или динамическая совокупность которых обеспечивает реализацию процессов генерации, преобразования, движения, передачи энергии в интеграции с процессами восприятия, обработки, трансляции и хранения информации при выполнении запрограммированных операций и действий в требуемых условиях эксплуатации с заданными функциональными, временными, энергетическими и надежностными показателями [2–4].

Изделие МСТ – комплектующее изделие электронной техники, идентифицируемое по признаку единого конструктивного исполнения электронной системы управления и микромеханических исполнительных устройств, принцип действия которых основан на электрофизических, электромеханических, электронно-оптических и фотоэлектронных процессах и явлениях. Изделие представляет собой совокупность электрически и механически соединенных функциональных узлов. Они образуют конструктивно законченную сборочную единицу, предназначенную для реализации функций приема, преобразования, передачи информации или энергии, исполнения функций конечного назначения. Изделие изготавливается по самостоятельным комплектам конструкторской и технологической документации. Изделия обладают свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости и не подвергаются несанкционированным изменениям в процессе применения.

Микросистемная техника – критически важное направление микроминиатюризации специальной техники. МСТ – динамично развивающееся научно-техническое направление микроминиатюризации электронных систем [5–7], которое внесено в Перечень критических технологий Российской Федерации, утвержденный Президентом РФ 30.03.2002, и в «Основы политики Российской Федерации в области развития электронной компонентной базы на период до 2010 года и дальнейшую перспективу», утвержденные Президентом РФ 11.04.2002 г.

Изделия МСТ представляют собой информационно-управляющие системы, объединяющие подсистемы сбора и обработки информации в реальном масштабе времени для последующей выработки воздействий на исполнительные элементы и далее – на объект управления. Указанные функции выполняются в заданных условиях с требуемыми информационными, энергетическими, временными и надежностными показателями. Развитие МСТ стало экономически обоснованным и технически оправданным с появлением нового поколения высоко интегрированных электронных и микромеханических компонентов, способных обеспечить работу функционально завершенных систем объемом в единицы кубических сантиметров. Изделия МСТ выполняются на основе материалов, конструкций, компонентов, групповых прецизионных процессов, научного и производственно-технологического заделов микроэлектроники [8, 9]. Принципиальное отличие изделий МСТ от изделий микроэлектроники состоит в трехмерности структур и возможности функционального механического перемещения исполнительных элементов [10, 11].

Функциональными элементами «интеллектуальной» электронной части изделий МСТ являются: чувствительные элементы – преобразователи физических величин и компонентов датчиков (первичные преобразователи информации); усилители, аналоговые ключи и коммутаторы, схемы выборки и хранения, фильтры, делители частоты и др. (устройства коммутации и нормализации сигналов); преобразователи цифроаналоговые и аналого-цифровые, компараторы напряжения (вторичные преобразователи информации); микроконтроллеры, микропроцессоры и цифровые процессоры сигналов (средства обработки информации); цифровые и логические схемы, запоминающие устройства (устройства обрамления); демультиплексоры (устройства вывода и распределения информации) [12].

Функциональными элементами исполнительной части МСТ являются: микромеханические устройства (электро-, опто-, оптоэлектро-, акустомеханические и др.) и узлы (двигатели, элементы гидравлики, сопла, поршни, захваты, зацепы, редукторы, шестерни, зеркала, приводы, оконечные силовые устройства и проч.), технологически и конструктивно выполненные в объеме и/или на поверхности полупроводникового кристалла с применением базовых и модифицированных технологических процессов микро- и оптоэлектроники, функциональной электроники (пьезо-, акусто- и др.).

Изделия МСТ с интегрированными «интеллектуальной» – электронной и исполнительной – микромеханической частями, размещенные совместно с источниками питания и объектами управления (микрокапсулами с веществами, видеокамерами инфракрасного диапазона, микрофонами, радиомаяками и др.) на мини- и микроплатформах-носителях образуют специальные микроробото-технические средства.

**Классификация изделий МСТ.** Изделия МСТ могут быть классифицированы по следующим критериям:

- область применения;
- функция назначения;

- вид физической или химической величины на входе МСТ;
- вид влияющей на МСТ физической или химической величины (характеристики среды эксплуатации);
- вид первичного и вторичного преобразования формы информации о физической или химической величине на входе МСТ;
- физический (физико-химический) принцип, положенный в основу преобразования формы информации о физической или химической величине на входе МСТ;
- вид исполнительного устройства (актюатора);
- вид встроенной в МСТ микроэлектромеханической или другой исполнительной структуры;
- технологический базис;
- материаловедческий базис (кремний и его «производные», гетероструктуры, сплавы и др.);
- конструктивное исполнение (корпусное, бескорпусное, гибридное, микромодульное);
- технический уровень (произведение числа транзисторов и механических компонентов, быстродействие, точность и т.п.).

Важнейшими из перечисленных классификационных критериев принято считать первые два.

Система параметров и характеристик изделий МСТ представляет совокупность входных, выходных, статических, динамических, энергетических, конструктивно-технологических, эксплуатационных, экономических параметров и характеристик. Электронная составляющая изделий МСТ представима системой из более 30 параметров, а параметры устройств исполнительной части изделий МСТ задаются, как правило, исходя из условий конкретной разработки и последующего применения.

**Факторы развития изделий МСТ.** Факторами, способствующими развитию изделий МСТ, являются:

- интеграционные процессы в микроэлектронике и смежных областях электроники (опто-, фото-, сверхвысокочастотной, квантовой, силовой);
- наличие научной и технологической культуры, сформировавшейся в период становления и развития электроники;
- наличие базового оборудования, производственных мощностей и организационной инфраструктуры электронного производства, пригодных для реализации изделий МСТ;
- развитие сенсорных систем различного функционального назначения и конструктивного исполнения на основе нового класса изделий микроэлектроники – преобразователей физических величин и компонентов датчиков;
- появление СБИС электронной части изделий МСТ (в том числе микроэлектронных сложно функциональных блоков, микропроцессоров с нейроподобной архитектурой), обеспечивающих качественно новый уровень «интеллектуальных» и скоростных возможностей обработки и передачи информации;
- появление микромеханических устройств, в которых гальванические связи находятся в тесном взаимодействии с механическими;
- формирование рынка миниатюрных недорогих медико-биологических диагностических изделий МСТ, используемых при выполнении антитеррористических и медико-биологических задач, «безлюдной» работы с радиоактивными, токсичными, взрывоопасными и другими веществами и материалами (в том числе в сверхмалых количествах и в ограниченных объемах).



Изделия МСТ стали результатом эволюционного развития критически важных технологий электроники XX века:

70-е годы – разработка и освоение промышленной технологии объемного жидкостного травления кремния;

80-е годы – разработка и освоение технологии формирования объемных структур с использованием фотолитографии, синхронного излучения, гальванического осаждения и прецизионного литья полимерами, использование кремния как полупроводникового и конструкционно-механического материала;

90-е годы – разработка и освоение технологии изготовления трехмерных полупроводниковых структур (3D-структуры), интегрирование электрических и оптических связей в кремниевых структурах, начало освоения технологических базисов нано- и биомолекулярных технологий.

В начале XXI века начинается разработка и освоение высоко интегрированных многоуровневых технологий с использованием базовых и модифицированных процессов микроэлектроники, интеграция физико-химических и технологических базисов микро- и биотехнологии, внедрение перспективных полупроводниковых широкозонных материалов и гетероструктур [1–3].

**Основные направления развития изделий МСТ.** К основным направлениям развития изделий МСТ относятся:

- микроэлектромеханические, микрооптоэлектромеханические, микрофлюидные и пневматические компоненты для информационно-управляющих, контрольно-измерительных и телерадиокоммуникационных систем;

- микромеханизмы и машины для генерации, преобразования и передачи энергии движения на микроуровнях;

- аналитико-технологические микросистемы, микроинструмент для контроля, диагностики и производства микроколичества материалов и веществ;

- конформные и «интеллектуальные» микроконструкции и системы на основе адаптивных материалов, самоформирующихся и организующихся сред.

Поэтому в прикладном плане разработки изделий МСТ и их функциональных узлов целесообразно направить на создание:

- микроэлектромеханических систем (механизмов, приводов, двигателей, управляемых конденсаторов, резисторов, зеркал, турбин, генераторов, модуляторов);

- электромагнитных микродвигателей по «объемной» волоконной технологии, микросистем энергообеспечения (миниатюрных автономных источников энергии, микротурбин, систем рекуперации энергии);

- преобразователей физических величин и компонентов датчиков;

- миниатюрных автономных систем навигации, совмещенных с космическими GPS системами;

- микромодулей контроля положения антенных фазированных решеток, систем индивидуального наведения;

- оптомеханических микросистем (оптоинтегральных схем и вычислителей, микрооптики, фотоэлектроники);

- биотехнических микросистем (миниатюрных автономных систем диагностики организма, замещения органов) [13–15];

- мультисенсорных микросистем;

- технологических микросистем (реакторов, насосов, инструментов, регуляторов);

- микроаналитических систем (миниатюрных аналитических приборов и микролабораторий);

- автономных многофункциональных диагностических и технологических мини-систем для экстремальных условий эксплуатации;
- мини- и микроробототехнических систем различного назначения.

**Области специального применения МСТ.** Важнейшими областями специального применения МСТ являются:

- микроробототехнические «интеллектуальные» системы (наземного и бортового базирования для мониторингирования обстановки, контроля химического и радиационного загрязнения, выполнения функций охраны, противодействия диверсиям, быстрого развертывания телекоммуникаций и связи и др.);
- микроэлектромеханические устройства (навигационные измерительные средства, электромеханические преобразователи сигналов радиосвязи, распределенные радарные средства, жидкостные системы контроля, оконечные силовые устройства управления приводами и двигательными установками, активные поверхности для аэродинамического управления летательными аппаратами, системы медико-биологического мониторинга);
- микрооптоэлектромеханические устройства (интегрированные системы опознавания, системы видеонаблюдения и формирования видеоизображений, электронные системы вычислительной техники и телекоммуникаций, оптоэлектронные процессоры, волоконно-оптические переключатели, модули памяти с большой плотностью записи и др.);
- микроакустоэлектромеханические устройства (камеры акустических изображений, генераторы акустических шумов, датчики контроля вибраций).

**Применение изделий МСТ в составе специальной техники.** Изделия МСТ и их функциональные узлы находят применение в специальной технике различного назначения.

Доминантой в применении изделий МСТ могут стать обеспечение противодействия стихийным бедствиям, терроризму, вооруженному нападению путем постановки электронных барьеров техническим средствам и людям, снижение маневренности противника путем обеспечения предупреждающих и упреждающих действий. Размещение изделий МСТ возможно в составе радиоэлектронной аппаратуры вспомогательных и обеспечивающих технических средств, специальной экипировки, объектов охраны, на местности (топографически). Основными выполняемыми функциями при этом являются опознавание, классификация и идентификация объектов (идентификация электромагнитных, звуковых, акустических, сейсмических, спектральных, магнитных, температурных, емкостных и других характеристик, установление специфических признаков объектов), обработка оперативных решений, выдача сигналов управления.

**Материаловедческий базис МСТ.** Условием развития изделий МСТ является создание материаловедческой базы в области [7, 8]:

- конструкционных материалов (стекло, монокристаллический, поликристаллический, пористый кремний, диоксид и нитрид кремния, полиимид, вольфрам, никель, медь, золото, алмазоподобный углерод), использующихся для формирования несущих конструкций, токоразводки, смазки;
- функционально-активных и адаптивно-рефлексивных (с «памятью формы») материалов (никель-титановые сплавы, пермалой, армированные волокнистые и слоистые стекло- и углепластики, магнитоstrictionные сплавы, пьезокерамика и пьезополимеры, сплавы на основе железа с добавлением редкоземельных металлов, композиты на основе титаната-цирконата свинца, поливинилденфторида, «умные» материалы на основе электроореологических жидкостей с использованием зависимости вязкости от

электрического поля), выполняющих за счет электростатических, электромеханических, пьезоэлектрических, магнитных, оптических явлений и эффекта памяти формы функции источников движения, механизмов передачи движения, сенсорных и активирующих сред с возможностью обеспечения адаптивных реакций и рефлексивного обучения;

– самоорганизующихся материалов, структуро- и формообразование которых зависит от степени неравновесности среды, с функциями многоустойчивости (реализация различных способов динамического взаимодействия элементов) как проявления диссипативности (активного рассеяния и обмена энергией); динамической памяти; сенсорной и кодирующей; избирательности (селективности) в структурных взаимодействиях; структурного усиления; семантической (внутреннее возмущение системы в процессе вынужденного перехода в новое состояние); двигательной; самодостройки (самовосстановление по исходному состоянию); структурной рефлексии (прием и кодирование внешних сигналов за счет структурной памяти вещества).

Технические требования (ТТ) к конструкционным материалам изделий МСТ возможно задавать исходя из выбора технологии изготовления (первичный фактор) и функционального назначения (вторичный фактор) изделий. Задание ТТ к конструкционным материалам изделий МСТ возможно путем нормирования:

– механических характеристик – упругости (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, пределы упругости и текучести); пластичности (критическое скалывающее напряжение, скорость деформации); прочности, твердости, хрупкости (предел прочности, критическое нормальное напряжение, теоретическая и реальная прочность);

– электрофизических характеристик – электропроводности, критической и пробивной напряженности электрического поля, электрической, электротепловой и электрохимической деградации;

– теплофизических характеристик – теплопроводности, коэффициентов теплового расширения, температуры Дебая, температуры размягчения, плавления, сублимации;

– кристаллохимической и термомеханической совместимости – по характеристикам и условиям технологического процесса изготовления изделия;

– механической и термомеханической усталости – количество циклов механического и температурного нагружения, срабатываний, кривая усталости.

Задание ТТ к функционально-активным материалам изделий МСТ возможно путем нормирования характеристик из следующего состава:

– пьезоэлектрики (прямой и обратный пьезоэффекты, электрострикция, пьезомодульность, коэффициент электромеханической связи);

– сегнетоэлектрики (спонтанная и вынужденная поляризации, доменная структура, точка Кюри, электрический гистерезис, память);

– электреты (гомо- и гетерозаряды, локализация зарядов, время жизни);

– пироэлектрики (пироэлектрическая поляризация);

– ферромагнетики (линейная и точки спонтанная магнитострикция, коэффициенты магнитострикции, механострикции, Кюри и Нееля);

– оптически активные (двойное лучепреломление, поляризация, фотопроводимость, люминесценция, зависимость показателя преломления от напряженности электрического и магнитного поля, дифракция света на акустических волнах, нелинейные оптические эффекты при воздействии световых пучков высокой интенсивности);

– гальваномагнитные, термомагнитные и термоэлектрические (эффекты Холла, Нернста, Риги-Ледюка, Эттингаузена, Зеебека и Пельтье, Томсона).



Задание ТТ к адаптивно-рефлексивным материалам изделий МСТ возможно путем нормирования [13, 14]:

- «градируемости» значения физического параметра или режимов действия (геометрические размеры; механические напряжения; активная проводимость; коэффициент оптического поглощения/отражения; электрический заряд, обусловленный электронным или ионным накоплением; статическая поляризация – электрический момент; намагничивание – магнитный момент; диэлектрическая и магнитная проницаемости; реактивные проводимости; амплитуда, частота и фаза осцилляций; скорость распространения и скважность импульсов; реактивность возбудимых сред; параметры устойчивых вариантов движения в фазовом пространстве состояний; состав и концентрация химических элементов; структура химических связей);

- «накопительности» – сохранения в «памяти» значения физического параметра после снятия сил воздействия (барьерность для переходов в смежные состояния); способностью к конвертации значений внешней физической величины в коллективное взаимодействие элементов системы (необратимость эволюции системы по отношению к адаптивным состояниям).

Задание ТТ к материалам изделий МСТ на основе самоорганизующихся сред (диссипативных систем) возможно путем нормирования:

- минимального значения пороговой мощности возбуждения;
- минимального линейного размера элемента;
- максимального удельного значения параметра поля, воздействующего на среду с больцмановским характером упорядоченности элементов (продольные градиенты температуры, электрических полей и др.);
- максимальной восприимчивости материала-носителя долговременной памяти к возбуждающим полям и возможности ее регулирования (запись/стирание памяти);
- максимальной разрешающей способности материала-носителя долговременной памяти;
- совместимости с материалами и технологиями микроэлектроники.

В целом отличительной особенностью материалов изделий МСТ является зависимость их параметров и характеристик от геометрических размеров при переходе к микромасштабам. Имеющиеся базовые справочные характеристики и параметры аналогичных макроматериалов не пригодны для обоснованного задания технических требований и объективного учета при проектировании и производстве изделий МСТ на основе этих же материалов микроразмеров. Разброс параметров микроматериалов изделий МСТ одного и того же вида (типа, марки, геометрических параметров и т.п.) не обеспечивает гарантий повторяемости электрофизических и химических параметров как в абсолютном представлении, так и в композиционном сочетании с другими материалами.

Создание МСТ на основе композиций разнородных материалов должно удовлетворять критериям кристаллохимической и термомеханической совместимости, тепловой, электрической, механической и радиационной стойкости, механической усталости.

**Технологический базис МСТ.** Основу базовых и модифицированных планарно-эпитаксиальных технологий изготовления функциональных элементов электронных устройств управления изделиями МСТ составляют многократно повторяющиеся технологические операции микроэлектроники по подготовке полупроводниковой подложки, окислению, фотолитографии, диффузии, эпитаксии, ионному легированию, металлизации [7, 8]. Основным направлением технологического развития изделий МСТ на 5–7 лет является совершенствование технологий создания высоко интегрированных кремниевых СБИС КМОП базиса и его модификаций. Актуально выполнение изделий

МСТ на основе субмикронных технологий микроэлектроники, позволяющих формировать в едином кристалле многоуровневые микросистемы (от одного до пяти уровней, включая подложку, слой формирования электронной схемы, и два-три поликремниевых механических слоя).

Трехмерный метод производства СБИС управления «интеллектуальной» части изделий МСТ имеет два кардинально новых преимущества: снижение на порядок цен в расчете на фиксированное устройство и рост числа транзисторов на кристалле с динамикой не меньшей, чем предусмотрено законом Мура.

Основу базовых технологий объемного формообразования функциональных элементов исполнительных микроэлектромеханических устройств изделий МСТ составляют такие технологические процессы, как

- объемная микрообработка (жидкое химическое анизотропное травление, при котором используется различие в скорости травления кремния в различных кристаллографических направлениях; сухое плазменное травление, при котором используется метод селективного удаления не маскированных участков поверхности. Данные процессы совместимы с процессами получения тонких пленок и КМОП-структур и позволяют контролировать профиль травления);

- поверхностная микрообработка (идентичны и совместимы с технологическими процессами фотолитографии и объемного травления);

- LIGA-процесс и его модификации (базируется на процессах рентгенолитографии, гальваники и формовки, которые позволяют достичь высокой эффективности экспонирования при малых временных затратах и получить глубокие структуры с отвесными стенками);

- SIGA-процесс (базируется на процессах ультрафиолетовой литографии, гальваники, формовки, которые позволяют управлять шириной профиля и хорошо совместимы с технологией получения тонких пленок);

- MUMPs-процесс и его модификации (совокупность унифицированных процессов трехслойной поликристаллической поверхностной микрообработки. Программное обеспечение предоставляет разработчику возможность моделирования рентабельного технологического процесса изготовления микроэлектромеханических структур, исходя из заданных требований);

- HART-процесс (формирование структур с высоким аспектным соотношением, т.е. большим отношением высоты к ширине, например формирование узкой и глубокой канавки в монокристаллическом кремнии).

В рассмотренных технологических процессах изготовления изделий МСТ активно используются базовые операции химического и плазмо-химического травления, маскирования, фотолитографии. Гибридная технология используется при необходимости применения в изделиях МСТ дискретных полупроводниковых приборов (диодов, мощных транзисторов и т.п.) и бескорпусных микросхем. При использовании технологий гибридной или планарно-объемной сборки многокристалльных модулей эти компоненты объединяются в единую корпусную конструкцию.

Наиболее важными направлениями развития технологий создания изделий МСТ являются:

- групповые прецизионные технологии создания полупроводниковых структур;

- групповые технологии «поверхностной» микромеханики на основе процессов тотального нанесения и избирательного удаления слоев;

- групповые технологии «объемной» микромеханики (глубинное объемное травление, LIGA-технологии, волоконные технологии);

– технологии индивидуальной обработки методом корпускулярно-лучевого микроформообразования.

Технологические операции и процессы изготовления устройств управления «интеллектуальной» части изделий МСТ идентичны базовым операциям и процессам, используемым в микроэлектронике, поэтому ТТ к ним возможно регламентировать комплексом общих технических условий на группу однородной продукции «микросхемы интегральные» (устанавливающим ТТ к технологическому процессу, системе и методам операционного и статистического контроля, статистического регулирования технологического процесса). Критичные операции изготовления изделий МСТ включают в себя химическую обработку; формирование диэлектрических слоев; литографию и травление; формирование переходов (включая диффузию, имплантацию, термообработку); получение металлических и поликремниевых слоев; контроль пластин перед разделением на кристаллы (включая контроль вольт-амперных характеристик, качества поверхности металлизации, оценку радиационной стойкости имитационными методами); разделение и ломка пластин на кристаллы; монтаж кристалла; присоединение выводов (включая термокомпрессионное и ультразвуковое); герметизацию (включая контактную шовную, пластмассой, пайкой).

ТТ к критичным операциям и процессам изготовления исполнительных микроэлектромеханических элементов и устройств изделий МСТ возможно задавать исходя из того, что их реализация с использованием технологии поверхностной микромеханики определяется технологичностью операций совмещения, стойкостью к длительному жидкостному травлению, отсутствию встроенных механических напряжений.

Все перечисленные условия определяются в основном параметрами критичных операций литографии и травления (скоростью травления, анизотропией скоростей травления в перпендикулярном и параллельном плоскости пластины направлениях, однородностью перечисленных параметров по площади пластины; стойкостью алюминиевого слоя к режиму травления; предельно допустимой для данной толщины слоя глубиной травления).

Исходя из условий и состава технологических операций создания исполнительных элементов МСТ с преобладанием в них критичных операций литографии и травления, возможно дополнительно задавать ТТ по контролю параметров технологического процесса: эпитаксиального наращивания (прогиб пластины, толщина скрытого слоя, относительная толщина эпитаксиального слоя); четкости, смещения и уходов контуров рельефа для эпитаксиальных слоев; измерения профиля распределения удельного сопротивления и концентрации электроактивной примеси; получения диэлектрических слоев, нанесения металлических пленок, вдавливания алюминия; содержания кремния и алюминия; скорости травления окисла; напряжения, создаваемого на пластине; адгезии металлических слоев; плотности дефектов поликристаллических слоев; литографии (адгезия слоя резиста); величины склона травления на боковых гранях элементов топологии; химического состава продуктов реакции на вытравленных поверхностях структуры; легирования (профиль распределения примесей и распределения носителей заряда, степени коробления пластин после термических операций) и др.

Критичные операции технологического процесса изготовления изделий МСТ в радиационно-стойком исполнении составляют операции до и после формирования слоев подзатворного (тонкого) и изолирующего (толстого) окислов, непосредственно связанные с проведением литографии и травления. Для минимизации радиационной деградации параметров элементов изделий МСТ важно контролировать:



– общие электрические параметры (пленочные сопротивления, напряжение пробоя переходов, сопротивления контактов, ионные загрязнения и продолжительность жизни неосновных носителей заряда);

– параметры приборов с МОП-структурой (толщина слоя подзатворного окисла, параметры МОП-транзисторов, пороговое напряжение, линейная межэлектродная проводимость, активная длина канала, токи включения и выключения, задержка распространения сигнала, токи утечки в структурах полевых транзисторов);

– параметры биполярных транзисторов (пленочное сопротивление, параметры диодов Шотки, напряжение пробоя при обратном смещении, прямое напряжение, коэффициент усиления, токи утечки, задержка времени распространения сигнала).

**Элементный базис МСТ.** Элементный базис «интеллектуальной» электронной части изделий МСТ представляет собой, как правило, встроенные заказные СБИС (заказные, сложно функциональные блоки, «системы на кристалле»), выполняемые на основе субмикронных технологий микроэлектроники, которые позволяют формировать в многоуровневых слоях (1–5 уровней, включая подложку, слой формирования электронной схемы, 2–3 поликремниевых механических слоя) также и исполнительные устройства МСТ. Элементный базис исполнительной части изделий МСТ на основе микроэлектромеханических устройств включает гребенчатые, зубчатые и роторные микродвигатели, устройства фиксации, микрорычаги, отражатели, генераторы-вибраторы, устройства фотоники, газовые детекторы, микродинамометры, микропоршни, микроблокираторы [1, 3, 9, 12].

**Критически важные направления развития МСТ.** Критически важным является дальнейшее развитие материально-технической и производственно-технологической базы производства изделий МСТ, измерительного и испытательного оборудования нового поколения, перспективных технологий проектирования и производства изделий микроэлектроники на принципах построения сложно-функциональных блоков и «систем на кристалле».

Развитие МСТ специального назначения затруднительно без решения проблем:

- системного проектирования, разработки и применения МСТ;
- создания функционально-полной номенклатуры компонентов и узлов МСТ;
- разработки и производства материалов для МСТ;
- разработки на основе технологий МСТ транспортных микросистем;
- создания на основе технологий МСТ распределенных систем сбора данных, приема, обработки и передачи информации;
- разработки программно-математического обеспечения;
- разработки методов и средств метрологического обеспечения и др.

Последовательное решение всех перечисленных проблем обеспечит динамичное развитие МСТ. Внедрение изделий МСТ в информационно-измерительные системы специального назначения по полученному эффекту может сравниться с революцией в радиоэлектронике времен появления первых транзисторов и интегральных микросхем.

Развитию МСТ в целом крайне необходима государственная и инвестиционная поддержка, поскольку уже в настоящее время научный и производственно-технологический потенциал отечественных предприятий по типовым показателям (освоение базовых и модифицированных технологических процессов, средств проектирования, программного обеспечения проектирования, производства и испытаний, способность к оперативной модернизации оборудования для решения возникающих технических задач) уступает мировому по экономическим и отраслевым возможностям,

достигнутым показателям технического уровня, уровню интеграции, функциональной сложности.

**Управление развитием изделий МСТ.** Управление развитием изделий МСТ предполагает [16]:

- анализ и учет исходных условий развития, связанных с достижениями в областях фундаментальных наук, материаловедения, технологий, методов и средств контроля, измерений и испытаний, программного обеспечения, автоматизированных средств проектирования, баз данных;

- задание технических требований к разработке, производству, поставке и эксплуатации изделий МСТ в соответствии с положениями комплексов государственных и отраслевых стандартов, формирование и реализация программ развития;

- формирование унифицированных рядов изделий МСТ;

- управление типажом изделий МСТ, проведение прогнозных исследований на основе динамических моделей развития.

Основой реализации программ развития изделий МСТ следует считать:

- разработку технических требований к изделиям МСТ;

- разработку нормативно-технической базы изделий МСТ;

- обоснование принципов построения базовых конструкций, технического облика и классификации изделий МСТ;

- разработку базовых и модифицированных технологий создания изделий МСТ;

- создание теории и технологий общего и специального применения МСТ;

- разработку комплексов специального программного обеспечения для решения задач проектирования и управления производством изделий МСТ;

- создание единого информационного пространства для поддержки полного жизненного цикла изделий МСТ от момента проектирования до производства, эксплуатации, снятия с эксплуатации и утилизации;

- создание методов и средств метрологического обеспечения и испытаний изделий МСТ на всех этапах их жизненного цикла.

Основными принципами организации работ по управлению развитием изделий МСТ следует считать:

- программное планирование научно-исследовательских, опытно-конструкторских и испытательных работ по созданию изделий МСТ;

- гибкое управление и финансирование работ, обеспечивающие реализацию программ развития изделий МСТ;

- выделение в качестве приоритетных направлений областей исследований, для которых в кратко- и среднесрочной перспективе существует реальная возможность сокращения или исключения отставания от мирового уровня;

- использование при создании изделий МСТ преимущественно отечественной элементной базы и технологий либо элементной базы и технологий, которые могут быть освоены отечественной промышленностью в период подготовки к серийному производству;

- координацию работ по созданию изделий МСТ в интересах всех заинтересованных потребителей;

- унификацию и стандартизацию изделий МСТ и их функциональных узлов;

- патентную чистоту проводимых исследований и разработок изделий МСТ, правовую охрану полученных результатов.



## Литература

1. **Лучинин В.В., Степанов Ю.И., Телец В.А.** Микросистемная техника. Прикладные области применения. – М.: МИРЭА. – 2004. – 100 с.
2. **Климов Д.М., Васильев А.А., Лучинин В.В., Мальцев П.П.** Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. – 1999. – № 1. – С. 3–6.
3. **Шелепин Н.А.** Кремниевые микросенсоры и микросистемы: от бытовой техники до авиационных приборов // Микросистемная техника. – 2000. – № 1. – С. 41–43.
4. **Вернер В.Д., Пурицхванидзе И.А.** Микросистемы: проблемы и решения // Микросистемная техника. – 2002. – № 10. – С. 13–18.
5. **Золотов И.Ю., Мальцев П.П.** Перспективы развития микросистемной техники в России // Изв. вузов. Электроника. – 2003. – № 1. – С. 49–56
6. **Иванов А.А., Мальцев П.П.** Микросистемная техника – основа научно-технической революции в военном деле // Микросистемная техника. – 2004. – № 10. – С. 2–6
7. **Лучинин В.В., Таиров Ю.М., Васильев А.А.** Особенности материаловедческого и технологического базиса микросистем // Микросистемная техника. – 1999. – № 1. – С. 7–11.
8. **Мальцев П.П., Телец В.А., Никифоров Ю.А.** Технология и изделия микроэлектромеханики // Микросистемная техника. – 2001. – № 10. – С. 18–24.
9. **Телец В.А., Негина Ю.С., Орлов А.А.** Изготовление трехмерных МЭМС методами термокомпрессионной сварки // Микросистемная техника. – 2004. – №4. – С. 2–6.
10. **Мальцев П.П., Никифоров А.Ю., Телец В.А.** Микроактюаторы. – М.: МИРЭА. – 2004. – 55 с.
11. **Корляков А.В., Лучинин В.В.** Перспективная элементная база микросистемной техники // Микросистемная техника. – 1999. – № 1. – С. 12–15.
12. **Телец В.А., Никифоров А.Ю.** Микроэлектронные преобразователи физических величин и компоненты датчиков – перспективная элементная база микросистемной техники // Микросистемная техника. – 2001. – № 1. – С. 13–18.
13. **Зими́на Т.М., Лучинин В.В., Крапивина Е.В., Ресин А.С.** Микросистемная техника и проблемы биомедицинского анализа // Микросистемная техника. – 2000. – № 3. – С. 18–30.
14. **Крапивина Е.В., Лучинин В.В.** Конструкторско-технологические основы жидкостных аналитико-технологических микросистем // Датчики и системы. – 2002. – № 9. – С. 13 – 16.
15. **Вернер В.Д., Чаплыгин Ю.А., Сауров А.Н., Шелепин Н.А.** Микросистемы и биочипы – трансферт технологии микроэлектроники // Электронные компоненты. – 2000. – № 1. – С. 3–5.
16. **Вернер В.Д., Мальцев П.П., Пурицхванидзе И.А.** Организация формирования и реализации национальных и региональных программ по микросистемам и нанотехнологии // Микросистемная техника. – 2002. – № 12. – С. 9–12.

Статья поступила  
26 апреля 2005 г.

**Телец Виталий Арсеньевич** – заместитель начальника ФГУП 22 ЦНИИ Минобороны России по научной работе, доктор технических наук, профессор. *Область научных интересов:* микроэлектроника и микросистемная техника, радиационная стойкость электронной компонентной базы, стандартизация, сертификация систем качества.

**Негина Юлия Сергеевна** – старший научный сотрудник научно-исследовательского испытательного центра ФГУП «22 ЦНИИ Минобороны России». *Область научных интересов:* прикладные вопросы применения изделий микросистемной техники.

**Орлов Андрей Александрович** – старший научный сотрудник научно-исследовательского испытательного центра ФГУП «22 ЦНИИ Минобороны России». *Область научных интересов:* разработка технических требований к технологическим процессам и элементной базе микросистемной техники.

# МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 539.3

## Неоднородность упругих свойств поликристаллических лент алюминия

*В.В.Бардушкин, В.Б.Яковлев, И.И.Булах*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

*М.М.Серов*

МАТИ – Российский государственный технологический  
университет им. К.Э.Циолковского

Проведены исследования характера изменения формы зерен и кристаллографической текстуры в процессе получения тонких алюминиевых лент, а также влияния этих факторов на структурно-чувствительные свойства материала. Показано наличие трехслойного строения ленты. Найдено распределение эффективных упругих модулей по толщине ленты. Проанализировано локальное напряженно-деформированное состояние кристаллитов при внешних механических воздействиях.

Закалка из расплава – одно из перспективных технологических направлений создания материалов с необычными физико-механическими свойствами. Тонкие поликристаллические текстурированные ленты, микропровода, микроиглки, тонкодисперсные порошки широко применяются в микроэлектронике, электронике и других отраслях промышленности. По своим потребительским свойствам и технологичности изготовления такая продукция заметно лучше аналогов, изготавливаемых по традиционным технологиям. Дальнейшее уменьшение элементов интегральных схем требует глубоких знаний в области взаимодействия элементов неоднородностей таких структур с целью обеспечения надежности и долговечности работы изделий электронной техники. В связи с этим возрастает интерес к исследованиям взаимосвязанных физических эффектов в подобных поликристаллических материалах.

В настоящей работе проведены исследования характера изменения формы зерен и кристаллографической текстуры в процессе закалки лент толщиной 70–100 мкм, полученных из алюминия марки А1 методом высокоскоростного затвердевания расплава (ВЗР), а также влияния указанных факторов на структурно-чувствительные свойства (модули упругости) материала и на распределение локальных значений напряжений при приложении к материалу внешних нагрузок. Несмотря на относительно малые толщины получаемых лент (порядка нескольких десятков микрон по толщине), их свойства претерпевают изменения при удалении от поверхности [1]. Это обусловлено термодинамическими условиями формирования таких материалов, фиксирующими метастабильные, но достаточно устойчивые состояния быстрозакаленных структур.



Изучение микроструктуры поперечного сечения быстрозакаленных алюминиевых лент проводилось с применением компьютерной программы «Видео-Тест». Для исследований использовались микрофотографии шести участков, расположенных по мере удаления от поверхности расплав–теплоприемник до внешней поверхности ленты. На каждом из них в поле зрения находилось от 25 до 72 зерен. На рис.1 показано изменение формы зерен по толщине ленты (участки 1, 2 и 6).

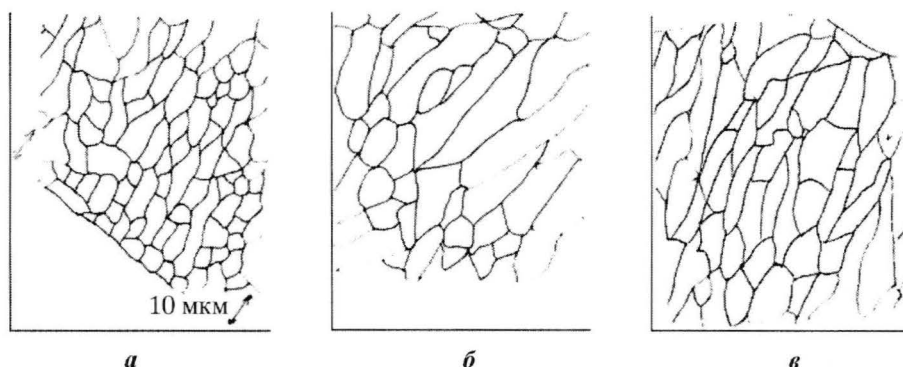


Рис.1. Изменение формы зерен по толщине ленты: а, б, в – участки 1, 2, 6 соответственно

Анализ полученной структуры осуществлялся на основании измерений следующих параметров зерна: длина, ширина, площадь, удлиненность, эквивалентный диаметр, коэффициент формы круга (данный коэффициент показывает, насколько форма зерна приближается к форме круга) и отклонение измеренных параметров структуры от средних значений (табл.1).

Таблица 1

Изменение формы и ориентации зерен по толщине алюминиевой ленты

Номер участка	1	2	3	4	5	6
Расстояние от контактной поверхности, мкм	0–30	20–50	40–70	50–80	60–90	80–100
Число измеренных зерен	71	28	18	32	28	34
Длина зерна, мкм	$11,4 \pm 5,1$	$19,7 \pm 13,6$	$23,9 \pm 11,2$	$21,2 \pm 8,8$	$24,1 \pm 11,2$	$18,6 \pm 8,5$
Ширина зерна, мкм	$6,3 \pm 1,8$	$8,6 \pm 3,5$	$9,3 \pm 4,0$	$7,7 \pm 2,1$	$8,5 \pm 2,1$	$7,3 \pm 3,0$
Удлиненность зерна, отн. ед.	$1,8 \pm 0,6$	$2,2 \pm 0,9$	$2,8 \pm 1,2$	$2,7 \pm 0,7$	$3,0 \pm 1,5$	$2,6 \pm 1,0$
Площадь зерна, мкм <sup>2</sup>	$52 \pm 34$	$123 \pm 118$	$133 \pm 81$	$113 \pm 69$	$130 \pm 73$	$94 \pm 60$
Эквивалентный диаметр зерна, мкм	$7,7 \pm 2,5$	$11,4 \pm 8,2$	$12,6 \pm 3,8$	$11,4 \pm 3,6$	$12,5 \pm 3,3$	$10,3 \pm 3,9$
Коэффициент формы круга	$0,73 \pm 0,11$	$0,64 \pm 0,17$	$0,53 \pm 0,18$	$0,57 \pm 0,13$	$0,56 \pm 0,19$	$0,57 \pm 0,18$

Текстурные исследования проводились на дифрактометре ДРОН-4-07 с излучающей трубкой типа 2БСВ-28 Cu. Для исследования текстуры использовалась гониометрическая приставка ГП-14 с увеличенной до 1 об/с скоростью вращения образца в его плоскости, при этом время экспозиции составляло 14 с. Образцы алюминиевой ленты исследовались как с наружной, так и с внутренней соприкасавшейся с теплоприемником стороны. Острота текстуры оценивалась по полуширине текстурной кривой на ее полувысоте, полученной методом поворота при быстром вращении образца. Обработка экспериментальных данных для получения обратных полюсных фигур проводилась по методу Бунге [1, 2]. Для получения более полной информации съемку проводили также на Fe-, Mo-излучениях (табл.2).

Таблица 2

**Изменение ориентации плоскостей кристаллической решетки  
по толщине алюминиевой ленты**

Расстояние от контактной поверхности, мкм	$\frac{I_{111}}{\sum I_{HKL}}$	$\frac{I_{200}}{\sum I_{HKL}}$	$\frac{I_{220}}{\sum I_{HKL}}$	$\frac{I_{311}}{\sum I_{HKL}}$	$\frac{I_{222}}{\sum I_{HKL}}$
0–10	0,66	0,05	0,09	0,13	0,07
0–40	0,53	0,10	0,07	0,15	0,15
50–70	0,21	0,17	0,06	0,51	0,05

Результаты исследований формы и размеров зерен лент алюминия показали, что у поверхности, контактирующей с теплоприемником, в основном располагаются равноосные мелкие зерна. При высоких степенях переохлаждения, которые наблюдаются при применении метода ВЗР, образуется большое количество зародышей кристаллов. В связи с этим участок 1 по сравнению с остальными участками характеризуется наибольшим количеством кристаллитов. Зерна на этом участке имеют наибольшую однородность (85–95%), наименьшую площадь, а также наименьшую удлиненность и наиболее округлую форму.

При дальнейшем продвижении фронта кристаллизации степень переохлаждения уменьшается, поэтому количество вновь зарождающихся кристаллов алюминия на сформировавшихся зернах нижнего слоя сокращается. По этой причине, начиная со второго участка, количество образовавшихся зерен меньше, чем на первом участке. Кроме того, при дальнейшем удалении по сечению ленты от поверхности расплава–теплоприемник зерна направлены практически перпендикулярно к ее поверхности. Это обусловлено тем, что при затвердевании возникают достаточно высокие градиенты температур в направлении, перпендикулярном плоскости ленты.

На участке 2 зерна становятся более вытянутыми, при этом увеличивается их средний размер. Таким образом, структура ленты начинает приближаться к столбчатой. Однако следует отметить, что наряду с новыми растущими столбчатыми кристаллами остается еще достаточно большое количество (приблизительно 40%) равноосных зерен. Анализ средних отклонений по всем исследуемым параметрам показывает, что на этом участке зерна наиболее сильно отличаются друг от друга (см. табл.1).

В дальнейшем происходит постоянное удлинение формы кристаллитов. Если на участке 2 зерен с отношением длины к ширине больше двух составляет около 50%, то на третьем участке их становится 72%, а на участке 4 их количество достигает 87%. Таким образом, структура становится ярко выраженной столбчатой и при этом достаточно однородной, так как в зоне столбчатых кристаллов 80% зерен примерно одинаковой средней ширины.

На участке 5 появляется некоторое количество (21%) очень длинных зерен, которые, по всей видимости, являются осями дендрита 1-го порядка. Удлиненность 46% зерен уменьшается, и начинают формироваться зерна, являющиеся осями дендрита 2-го порядка. Следует также отметить, что на этом участке наблюдается большой разброс значений удлиненности. Все это говорит о том, что структура алюминиевой ленты претерпевает очередное изменение – столбчатая структура начинает переходить в дендритную.

Этот процесс продолжается на участке 6. На границе расплав–вакуум происходит некоторое уменьшение среднего значения площади, длины и удлиненности зерен, но эти параметры не возвращаются к своим первоначальным значениям, зафиксированным на участке 1. Разброс этих параметров достаточно большой. Площадь зерен колеблется в интервале от 10 до 250 мкм<sup>2</sup>, причем число крупных зерен достигает 38%, а мелких зерен с площадью порядка 50 мкм<sup>2</sup> составляет 26%. При этом по ширине 80% дендритов имеют примерно одинаковое среднее значение. Зерна здесь также остаются

неправильной геометрической формы. Это свидетельствует о том, что при приближении к внешней поверхности ленты в структуре формируется зона дендритов.

Результаты рентгеноструктурных исследований лент алюминия показывают, что у поверхности, контактирующей с теплоприемником, в основном располагаются плоскости (111). Наибольшая интенсивность отражения от плоскостей (111) приходится на слой затвердевшего металла, который расположен на глубине до 15 мкм от контактной стороны. На расстоянии 70 мкм от контактной поверхности для затвердевшего алюминиевого расплава максимальную интенсивность имеют плоскости (311) и (110).

В соответствии с правилом Кюри–Вульфа [3] наиболее развитыми на поверхности кристалла будут грани с наименьшими скоростями роста. Эта теория во многих случаях хорошо описывает наиболее общие черты габитуса кристаллов. Таким образом, обнаруженная последовательность изменений преимущественной ориентации плоскостей кристаллической решетки отражает изменение габитуса растущих кристаллитов при затвердевании расплава на вращающемся теплоприемнике.

Для анализа структурно-чувствительных свойств исследуемых лент в работе были проведены вычисления эффективных упругих характеристик и оператора концентраций внутренних напряжений. При анализе этих характеристик использовалось обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей. Основное расчетное соотношение для эффективных свойств в рамках этого приближения имеет вид [1, 4]

$$c^* = \langle c(I - gc'')^{-1} \rangle > \langle (I - gc'')^{-1} \rangle^{-1}.$$

Здесь эффективные характеристики определяются из соотношения  $\langle \sigma(\mathbf{r}) \rangle = c^* \langle \varepsilon(\mathbf{r}) \rangle$ , где угловые скобки определяют усреднение по объему материала;  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $c$  – тензоры напряжений, деформаций, модулей упругости соответственно;  $g$  – интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнения равновесия;  $I$  – единичный тензор четвертого ранга. Двумя штрихами обозначена разность между соответствующими параметрами неоднородной среды и однородного тела сравнения  $c''(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r}) - c^c$  (верхним индексом «с» обозначены характеристики тела сравнения). Эти величины являются случайными функциями координат  $\mathbf{r}$ . Усреднение характеристик для произвольной случайной величины  $a(\mathbf{r})$  проводилось по формуле

$$\langle a \rangle = \frac{1}{8\pi^2} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\varphi_1, \Phi, \varphi_2) a(\varphi_1, \Phi, \varphi_2) \sin \Phi d\Phi d\varphi_1 d\varphi_2,$$

где  $f(\varphi_1, \Phi, \varphi_2)$  – функция распределения ориентаций кристаллографических осей кристаллитов (ФРО);  $\varphi_1$ ,  $\Phi$ ,  $\varphi_2$  – углы Эйлера. Значения коэффициентов функции распределения были взяты из работы [1]. Эффективные модули упругости вычислялись методом самосогласования [4]. Тензор  $g$  вычислялся с использованием фурье-образа сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнения равновесия  $g_{ijkl} = a_{i(kl)(j}$  (по индексам, заключенным в выражении для тензора  $g_{ijkl}$  в круглые

скобки, осуществляется операция симметризации). Здесь  $a_{iklj} = -\frac{1}{4\pi} \int n_k n_j b_{il} d\Omega$ , где  $b_{il}$  – элементы матрицы, обратной матрице  $T$  с элементами  $t_{il} = c_{inlm}^c n_n n_m$ ;  $n_i$  – компоненты вектора нормали к поверхности включения эллипсоидальной формы с главными полуосями  $l_1$ ,  $l_2$  и  $l_3$ . При этом  $n_1 = \frac{1}{l_1} \sin \theta \cos \varphi$ ,  $n_2 = \frac{1}{l_2} \sin \theta \sin \varphi$ ,  $n_3 = \frac{1}{l_3} \cos \theta$ ,  $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ . Использовались следующие значения:  $l_1 = l_2 = 1$  и  $l_3 = R$ .



Результаты расчетов структурно-чувствительных свойств исследуемых алюминиевых лент показаны на рис.2 (на рисунке не приведено распределение компонент тензора эффективных модулей упругости  $c_{12}^*(h)$  и  $c_{23}^*(h) = c_{13}^*(h)$  по толщине ленты  $h$ , что обусловлено тем, что график  $c_{12}^*(h)$  аналогичен графику  $c_{66}^*(h)$ , график  $c_{13}^*(h)$  аналогичен графику  $c_{44}^*(h)$ , причем  $c_{12}^*(h) \approx 2,25c_{66}^*(h)$ ,  $c_{13}^*(h) \approx 2,25c_{44}^*(h)$ ). Расчеты показали, что эффективные упругие модули на внутренней и внешней сторонах ленты практически совпадают, т.е.  $c_{ij}^*(h_{\min}) \approx c_{ij}^*(h_{\max})$ . Кроме того,  $c_{11}^*(h_{\min}) \approx c_{33}^*(h_{\min})$ ,  $c_{12}^*(h_{\min}) \approx c_{13}^*(h_{\min})$ ,  $c_{44}^*(h_{\min}) \approx c_{66}^*(h_{\min})$ . Наибольшие различия для пар компонент  $c_{11}^*$  и  $c_{33}^*$ ,  $c_{12}^*$  и  $c_{13}^*$ ,  $c_{44}^*$  и  $c_{66}^*$  наблюдаются на расстояниях  $h$  от 65 до 85 мкм. На внешней стороне ленты для указанных пар значения упругих модулей отличаются друг от друга незначительно.

На рис.3 представлена зависимость параметра анизотропии  $A_z = (c_{33}^* - c_{23}^*) / (2c_{66}^*)$  ленты в направлении, перпендикулярном ее поверхности от толщины. Отметим, что отклонение значений параметра анизотропии от единицы характеризует не только количественное изменение свойств, но и качественно иное состояние структуры. Отметим, что все графики построены по ограниченному количеству точек, соответствующих глубине проникновения рентгеновского излучения в материал, а затем сглажены сплайнами.

Для микронеоднородных текстурированных материалов, к которым относятся поликристаллы, очень важной является характеристика распределения локальных значений напряжений при приложении внешних нагрузок. Это соответствует установлению связи между приложенными к поликристаллическому образцу напряжениями и их локальными значениями внутри зерен неоднородности поликристалла. Рассмотрение поликристалла как случайно-неоднородной среды и анализ его механических свойств при помощи уравнений равновесия со случайными кусочно-неоднородными коэффициентами позволяет не только определить эффективные параметры текстурированного поликристалла, но и оценить значения локального напряженно-деформированного состояния. Наиболее удобно это сделать при помощи оператора концентраций полей напряжений, связывающего локальные значения напряжений с внешними значениями по материалу:

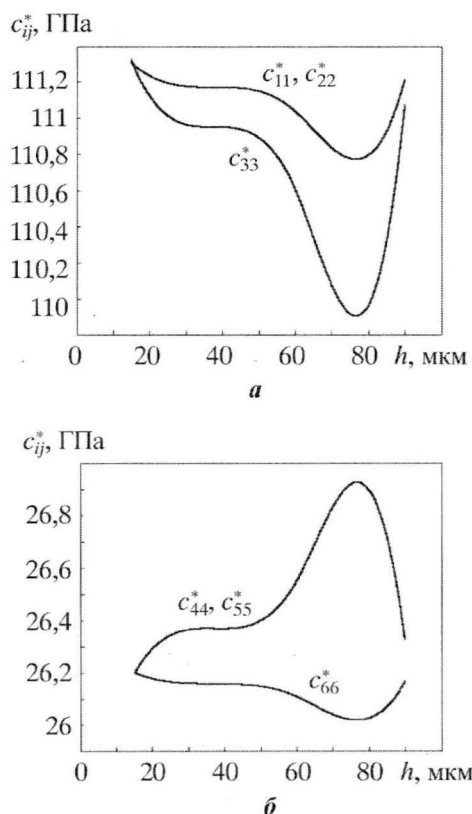


Рис.2. Распределение эффективных модулей упругости по толщине алюминиевой ленты  $c_{11}^*, c_{22}^*, c_{33}^*$  (а) и  $c_{44}^*, c_{55}^*, c_{66}^*$  (б)

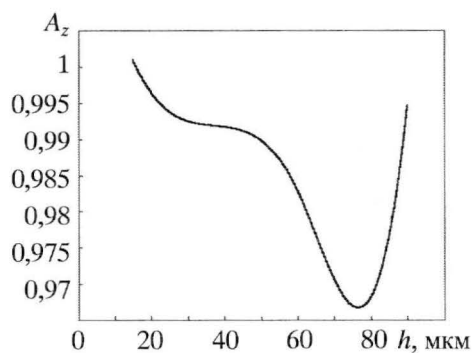


Рис.3. Характер изменения параметра упругой анизотропии  $A_z$  в зависимости от расстояния  $h$  от теплоприемника

$$\sigma(\mathbf{r}) = K^{\sigma}(\mathbf{r}) < \sigma(\mathbf{r}) > .$$

Необходимо отметить, что в этом случае оператор концентраций зависит только от структуры и свойств среды, но не зависит от прикладываемого воздействия. Используя предположения, аналогичные методам расчета эффективных характеристик, получается следующее соотношение для оператора концентраций полей напряжений [5]:

$$K^{\sigma}(\mathbf{r}) = c(\mathbf{r})(I - gc''(\mathbf{r}))^{-1} < c(\mathbf{r})(I - gc''(\mathbf{r}))^{-1} >^{-1} .$$

Для исследуемых лент алюминия был вычислен оператор  $K^{\sigma}(\mathbf{r})$ , с помощью которого можно оценить значения локальных напряжений, возникающих при любом внешнем воздействии.

Поскольку, как показано в [1], ФРО  $f(\varphi_1, \Phi, \varphi_2)$  не зависит от эйлеровых углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , была исследована зависимость  $K^{\sigma}(\mathbf{r})$  только от угла  $\Phi$ . На рис.4 приведены расчетные зависимости некоторых компонент тензоров внутренних напряжений для кристаллитов от угла  $\Phi$  и расстояния  $h$  от теплоприемника.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Очевидными являются три термодинамических режима формирования ленты. При затвердевании расплава на вращающемся теплоприемнике в зоне расплава толщиной 10–30 мкм в условиях значительного переохлаждения формируется зона мелких равноосных кристаллов, ограниченных плоскостями (111). По мере удаления от контактной поверхности в результате выделения теплоты кристаллизации меняется форма зерен и их огранка. Зерна становятся вытянутыми, ориентация их становится более однородной, а максимальную интенсивность имеют плоскости (311) и (110). На внешней стороне ленты столбчатая структура начинает переходить в дендритную, что сопровождается некоторым уменьшением размера зерна и увеличением разброса средних значений. Следует отметить, что удлиненность зерен фактически перпендикулярна поверхности ленты.

Алюминий принадлежит к кубическому классу симметрии, однако результаты расчетов эффективных упругих характеристик тонкой алюминиевой ленты показали, что они трансверсально изотропны. Причем центральный слой ленты обладает более ярко выраженной гексагональной симметрией свойств, что объясняется наличием теплоотвода в направлении перпендикуляра к плоскости быстроокаленной ленты.

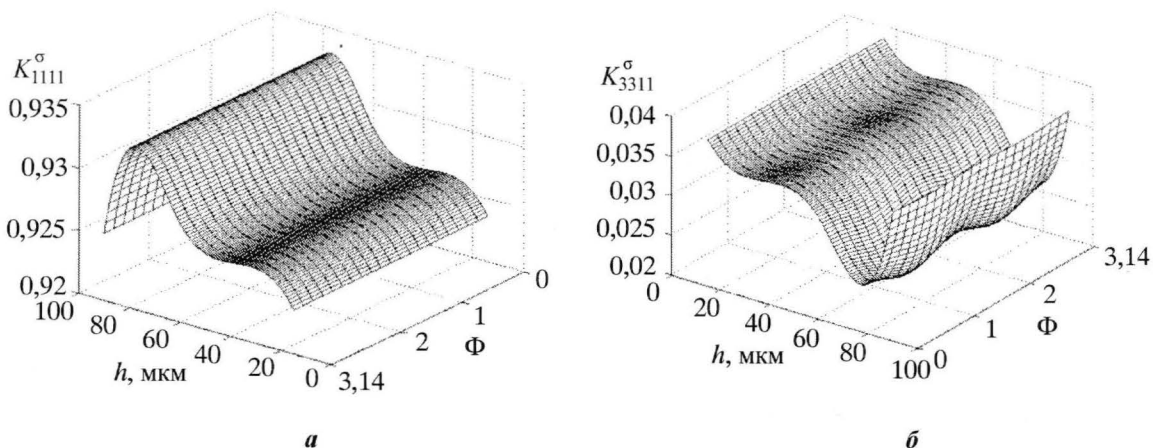


Рис.4. Значения компонент  $K_{111}^{\sigma}$  (а) и  $K_{331}^{\sigma}$  (б) оператора концентраций напряжений в зависимости от угла  $\Phi$  и расстояния  $h$  от теплоприемника

Расчеты зависимости коэффициента анизотропии  $A_z$  от расстояния  $h$  от теплоприемника показали, что отклонение значений данного параметра от единицы (т.е. отклонение структуры поликристалла от изотропной) составляет около 3%. Однако это отклонение может оказаться значимым для рабочих характеристик поликристалла.

Из проведенных расчетов следует, что оператор концентраций напряжений практически не зависит от угла  $\Phi$ . На расстоянии  $h \approx 80$  мкм от теплоприемника при любом сечении плоскостями  $\Phi = \text{const}$  для оператора  $K^\sigma(\mathbf{r})$  наблюдаются экстремумы, а на внутренней и внешней сторонах ленты значения компонент  $K^\sigma(\mathbf{r})$  отличаются мало.

Данные рентгенографических экспериментов, расчеты распределения эффективных упругих модулей и локального напряженно деформированного состояния кристаллитов по толщине подтверждают трехслойность структуры поликристаллических лент алюминия, полученных методом высокоскоростной закалки расплава.

### Литература

1. Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технология, материалы) / **В.А.Васильев, Б.С.Митин, М.М.Серов и др.** – М.: Интермет Инжиниринг, 1998. – 395 с.
2. **Bunge H.J.** Texture Analysis in Material Science. – London: Butterworth Pub., 1982. – 400 p.
3. **Чернов А.А.** Современная кристаллография. – М.: Наука, 1980. – Т. 3. Образование кристаллов. – 451 с.
4. **Шермергор Т.Д.** Теория упругости микронеднородных сред. – М.: Наука, 1977. – 399 с.
5. **Yakovlev V.B.** Local stress-strain conditions of textured polycrystals under high pressure // High Pressure Research. – 2000. – Vol. 17. – P. 375–383.

Статья поступила  
17 января 2005 г.

**Бардушкин Владимир Валентинович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики № 2 МИЭТ. *Область научных интересов:* теоретические основы расчета напряженно-деформированного состояния поликристаллов и композитов, прогнозирование их механических свойств.

**Серов Михаил Михайлович** – доктор технических наук, профессор Российского государственного технологического университета им. К.Э.Циолковского (МАТИ). *Область научных интересов:* технология быстрой закалки.

**Яковлев Виктор Борисович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики № 2 МИЭТ. *Область научных интересов:* физика и механика поликристаллических и композитных сред

**Булах Ирина Игоревна** – аспирант Учебно-научного центра перспективных технологий опто- и наноэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* теоретические основы расчета напряженно-деформированного состояния поликристаллов и композитов.



## Управление свойствами оксидных многокомпонентных материалов с использованием модифицирующих элементов

*Л.П.Батюня*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Исследовано влияние модифицирующих добавок на свойства электрооптической сегнетокерамики состава скандата-ниобата свинца.

Разработка технологии получения новых материалов с комплексом заранее заданных свойств может быть успешно осуществлена с использованием модифицирующих, в том числе и гетеровалентных элементов. Вводимые ионы в зависимости от валентности и ионного радиуса могут замещать элементы как в подрешетке *A*, так и в подрешетке *B* кристаллической структуры, вызывая возникновение либо компенсации вакансий, которые существенно определяют свойства модифицированного материала. При разработке новых составов прозрачной сегнетокерамики скандата-ниобата свинца (СНС) основной задачей является получение материала с новыми сочетаниями свойств.

Оптическая прозрачность в первую очередь связана с отсутствием поглощения в заданной области спектра у соединений, входящих в состав твердого раствора. Есть основания полагать, что светопропускание будет зависеть и от типа вакансий в структуре твердого раствора. Известно, например, что введение модификатора, создающего вакансии *A*-типа, в твердый раствор системы цирконат-титанат свинца (ЦТС) приводит к получению полупрозрачной сегнетокерамики. В то же время модификатор, вызывающий появление вакансий *B*-типа, резко ухудшает прозрачность материала [1].

К факторам, ухудшающим оптическую прозрачность, относится присутствие в сегнетокерамике рассеивающих центров, а также примесей, поглощающих свет в данном интервале длин волн. К рассеивающим центрам относятся объемная остаточная пористость, области с нарушенной стехиометрией состава, дислокации.

К поглощающим примесям относятся прежде всего технологические примеси, например железо, хром, а также свободный оксид свинца, локализованный на границах зерен и на внутренней поверхности пор. Если радиус катиона добавки больше радиуса катиона основного вещества, то в последнем возникают растягивающие напряжения. С одной стороны, это приводит к уменьшению предела растворимости, а с другой – может приводить к возникновению вакансий обоих знаков. Второй процесс может несколько расширять виды используемых добавок. При исследовании твердого раствора системы  $\text{Pb}(\text{Sc}_{0,5}\text{Nb}_{0,5})_x\text{R}_{1-x}\text{O}_3$ , где *R* – Ti, Zr, Hf, установлено, что при замене ионов Ti на Zr и Zr на Hf температура Кюри уменьшается от первого к последнему. С увеличением концентрации данных добавок температура Кюри такой системы твердых растворов увеличивается. Качественно эта закономерность объяснима, так как температура перехода  $\text{PbTiO}_3$  больше, чем для  $\text{PbZrO}_3$ , в свою очередь температура перехода  $\text{PbZrO}_3$  больше, чем для  $\text{PbHfO}_3$ , но температура перехода всех трех составов больше, чем для

$\text{Pb}(\text{Sc}_{0,5}\text{Nb}_{0,5})\text{O}_3$ . Следовательно, для температуры Кюри имеется тенденция систематически уменьшаться при замене иона в подрешетке *B* (внутри кислородного октаэдра) ионами другого материала, расположенного ниже в данной группе периодической системы. Например, температура Кюри уменьшается при перемещении вниз по группе IVb от Ti к Zr и Hf или вниз по группе Vb от Nb к Ta [2].

В настоящей работе исследован состав  $\text{Pb}(\text{Sc}_{0,5}\text{Nb}_{0,5})_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_3$ , ( $x = 0,1-1,0$  ат.%). Установлено, что с увеличением содержания циркония «размытость» ФП вначале уменьшается ( $x = 0,10$ ), затем резко увеличивается ( $x = 0,20$ ) и далее снова начинает уменьшаться. При значениях  $x = 0,85$  и выше твердые растворы становятся антисегнетоэлектриками. Величина сдвига точки Кюри уменьшается с ростом содержания циркония до тех пор, пока при  $x = 0,85$  этот частотный сдвиг практически не обращается в нуль.

Представляет интерес модифицирование сегнетокерамики СНС  $\text{Pb}(\text{Sc}_{0,5}\text{Nb}_{0,5})\text{O}_3$  ионами бария. При этом удастся целенаправленно изменять физические свойства материала.

Температура максимума диэлектрической проницаемости понижается с увеличением концентрации ионов бария. Сегнетокерамика, содержащая 6 ат.% бария, имеет температуру Кюри  $T_K$ , близкую к комнатной температуре, хорошую прозрачность и может быть использована в модуляторах света, работающих в области температур ниже  $0^\circ\text{C}$ . При температуре  $-50^\circ\text{C}$  данный материал имеет эффективный квадратичный электрооптический (ЭО) коэффициент. Указанная сегнетокерамика может использоваться в устройствах, работающих при пониженных температурах в режиме квадратичного ЭО-

На основе твердых растворов  $\text{Pb}(\text{Sc}_{0,5}\text{Nb}_{0,5})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  и  $\text{Pb}(\text{Sc}_{0,5}\text{Nb}_{0,5})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  был синтезирован ряд новых прозрачных сегнетокерамик.

В твердых растворах  $\text{Pb}(\text{Sc}_{0,5}\text{Nb}_{0,5})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  среднее светопропускание материала составляет 50% при длине волны  $\lambda = 0,633$  мкм. При комнатной температуре отдельные составы сегнетокерамики СНС–ЦНС имеют прямоугольные петли диэлектрического гистерезиса, малые значения коэрцитивной силы ( $E \approx 2,0$  кВ/см) и высокую контрастность (90:1).

Светопропускание твердых растворов  $\text{Pb}(\text{Sc}_{0,5}\text{Nb}_{0,5})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  достигает 50% при длине волны 0,633 мкм и толщине пластин 300 мкм, коэрцитивная сила 2,0 кВ/см, прямоугольность петель диэлектрического гистерезиса  $\approx 0,9$ , контрастность 100:1. Данная ЭО-керамика пригодна для применения в устройствах, работающих на основе использования эффекта электрооптической памяти.

С целью изменения свойств материалов скандата-ниобата свинца состава  $\text{Pb}(\text{Sc}_{0,5-x}\text{Nb}_{0,5}\text{R}_x)\text{O}_3$  проводилось исследование влияния «сегнетожестких» модифицирующих добавок оксидов *d*-группы –  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ , а также частичного замещения иона  $\text{Sc}^{3+}$  на ионы  $\text{Ga}^{3+}$  и  $\text{In}^{3+}$  ( $x = 0,025-0,1$  ат.%) [3].

Сегнетокерамика СНС без модифицирующих добавок, полученная горячим прессованием, обладает мелкозернистой структурой со средним размером зерен 2–3 мкм. Небольшие добавки ионов индия резко увеличивают размер зерен до 4–6 мкм. В зависимости от концентрации модифицирующей добавки (иона галлия) размер зерен сегнетокерамики уменьшается до 1–3 мкм.

Исследована зависимость диэлектрической проницаемости от вида и концентрации добавок ионов  $\text{Ga}^{3+}$  и  $\text{In}^{3+}$  (рис.1). Сужение петель диэлектрического гистерезиса свидетельствует о понижении температуры фазового перехода.

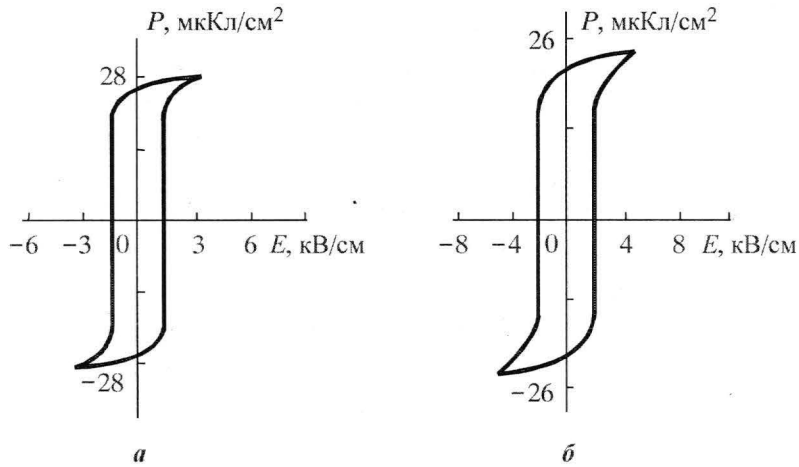


Рис.1. Петли диэлектрического гистерезиса сегнетокерамики СНС с модифицирующими добавками: а - 0,1% галлия и б - 0,1% индия (вес.%)

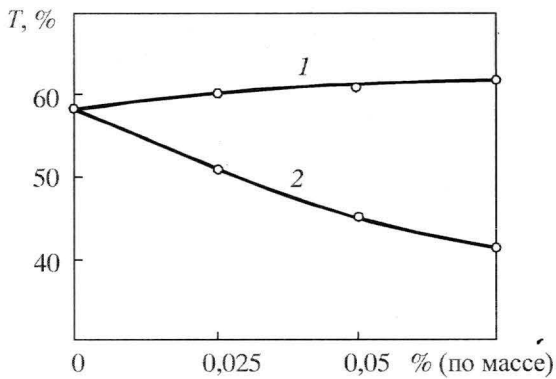


Рис.2. Зависимость светопропускания сегнетокерамики СНС от концентрации модифицирующих добавок галлия (1) и индия (2)

Исследовалась зависимость светопропускания образцов при длине волны 0,633 мкм от концентрации модифицирующих добавок. Образцы с добавками ионов галлия имеют достаточно высокую прозрачность – 60–62%, добавки индия приводят к некоторому снижению светопропускания – до 42–52% (рис.2).

Исследование влияния частичного замещения иона  $\text{Sc}^{3+}$  на ионы  $\text{Ga}^{3+}$  и  $\text{In}^{3+}$  показало, что диэлектрическая проницаемость и температура максимума диэлектрической проницаемости снижаются; добавки элементов железа, кобальта и никеля приводят к

увеличению диэлектрической проницаемости, температуры Кюри и коэрцитивной силы  $E_c$ . С увеличением концентрации элементов индия, железа, кобальта и никеля светопропускание образцов уменьшается до 40%, что связано, по-видимому, с неполным замещением ионов в кристаллической структуре сегнетокерамики (таблица).

#### Электрофизические свойства сегнетокерамики состава $\text{Pb}(\text{Sc}_{0,5-x}\text{R}_x\text{Nb}_{0,5})\text{O}_3$ с модифицирующими добавками

Модификатор R	Содержание x, ат. %	$\epsilon_{\text{макс}}$	$T_K, ^\circ\text{C}$	$\text{tg } \delta$	$E_c, \text{кВ/см}$
—	0	50445	105	0,028	2,5
$\text{Ga}^{3+}$	0,025	41866	101	0,029	2,3
	0,05	39606	100	0,031	2,0
	0,10	38138	93	0,025	1,6
	0,10	38138	93	0,025	1,6
$\text{In}^{3+}$	0,025	46377	103	0,033	2,5
	0,5	40727	100	0,030	2,2
	0,10	36948	97	0,028	2,0
$\text{Fe}^{3+}$	0,05	52620	114	0,031	4,9
$\text{Co}^{3+}$	0,05	53863	116	0,025	6,6
$\text{Ni}^{3+}$	0,05	53449	113	0,027	5,0



Таким образом, введение модифицирующих добавок некоторых элементов позволяет изменять оптические, электрофизические и электрооптические характеристики сегнетокерамики СНС и получать составы с заданными свойствами.

### Литература

1. Шарин А.Г., Батюня Л.П., Раскин А.А. Керамика на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС) и цирконата-титаната свинца-лантана (ЦТСЛ) // Зарубежная электронная техника. – 1999. – № 2. – С. 99–118.
2. Hosono Yasuharu, Yamashita Yahachi, Sakamoto Hideya, Ichinose Noboru. Growth of single crystals of high-curie-temperature  $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3$  ternary systems near morphotropic phase boundary // Jap. J. Appl. Phys. – 2003. – Vol. 42, № 9A. – P. 5681–5686.
3. Batjunja L.P., Pozarsku B.G., Yolik N.N., Schamsiew R.M. Peculiarities of production of transparent ferroelectric ceramics based on lead – scandium niobate // Ferroelectrics. – 1986. – Vol. 69. – P. 33–37.

Статья поступила 3 октября 2005 г.

**Батюня Людмила Павловна** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры материалов и процессов твердотельной электроники МИЭТ. Область научных интересов: технология многокомпонентных оксидных материалов электронной техники.

## 2-я Международная научно-техническая конференция

### «Информационные технологии в науке, технике и образовании»

Республика Абхазия, Пицунда, сентябрь – октябрь 2006 года (дата будет уточнена)

#### Тематика конференции

- Авиационно-космические технологии и приборы
- Акусто- и магнитоэлектронные технологии в науке, технике и образовании
- Гидрофизика и морское приборостроение
- Космический мониторинг окружающей среды, вопросы экологии
- Моделирование технологических систем и процессов
- Медицинское приборостроение
- Новые материалы и технологии в приборо- и машиностроении
- Обеспечение качества и надежности приборов и аппаратуры
- Стойкость материалов и приборов к воздействию деструктивных внешних факторов, включая радиацию
- Физические процессы в материалах, структурах и приборах микро-, нано- и оптоэлектроники

Предложения по расширению тематики как со стороны организаций, так и отдельных представителей будут учтены.

**Организаторы:** Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова (АИН РФ), Государственное научно-производственное объединение «Сухумский физико-технический институт» (ГНПО «СФТИ»), Военно-топографическое управление Генерального Штаба МО РФ и др.

**Председатель Оргкомитета** – вице-президент Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова д-р, физ.-мат. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ Кубарев Юрий Васильевич.

**Ответственный секретарь** – Трубицын Александр Константинович, Госдума РФ.

e-mail: [aou@duma.gov.ru](mailto:aou@duma.gov.ru) Тел.: (095) 692-68-54

Информацию о I-й Международной конференции, прошедшей с 27 сентября по 8 октября 2005 г., читайте в журнале №1 2006 г.

## Диагностика субмикронных приповерхностных повреждений в пластинах кремния после двухстороннего химико-механического полирования

*В.В.Соловей*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

*Ю.М.Литвинов*

ОАО «ЭЛМА» (г. Москва)

Методом осесимметричного изгиба оценена максимальная глубина приповерхностных повреждений в пластинах кремния после первой и второй стадий двухстороннего химико-механического полирования. Показано, что плотность окислительных дефектов упаковки (ОДУ) после различных этапов двухстороннего химико-механического полирования коррелирует с максимальной глубиной приповерхностных повреждений. Неоднородное распределение ОДУ по поверхности пластин объяснено особенностями проведения процесса двухстороннего химико-механического полирования.

В современной микроэлектронной промышленности хорошо изучен и широко применяется метод одностороннего химико-механического полирования (ХМП). Однако в случаях, когда обе стороны пластины должны быть полированными, процесс ХМП на пластине проводится дважды, что требует увеличения затрат времени и вспомогательных материалов. Кроме того, удвоение количества технологических операций над пластинами ведет к уменьшению коэффициента выхода годных. Применение операции двухстороннего химико-механического полирования (ДХМП) значительно облегчает получение таких пластин кремния. Отметим, что для проведения операции ДХМП применяется конструктивно более сложное оборудование, что увеличивает количество параметров, влияющих на его проведение.

Разработанная технология ДХМП [1, 2] позволила получить пластины кремния диаметром 150 мм с локальным отклонением от плоскостности 0,3 мкм на чипе 15×15 мм с долей годной площади на пластине, равной 1 (выход годной площади – 100%). Достижение данных геометрических параметров обеспечивает возможность использования таких пластин в технологии получения СБИС с минимальным топологическим размером элементов (CD – critical dimension) 0,35 мкм.

Не менее жесткие требования предъявляются к качеству поверхности пластин после химико-механического полирования (ХМП). Качество поверхности оценивают по поверхностной плотности окислительных дефектов упаковки (ОДУ) [3]. Согласно [3] допустимая плотность ОДУ связана с минимальным топологическим размером элементов соотношением:  $N_{\text{ОДУ}} = K(\text{CD})^m$ , где  $K = 2,75 \cdot 10^{-3}$ ,  $m = 1,42$  (CD выражается в нм,  $N_{\text{ОДУ}}$  – в  $\text{см}^{-2}$ ). Считается, что после ХМП должен формироваться бездефектный приповерхностный слой (без трещин, дислокаций и дальнотействующих полей деформации). Эти жесткие требования обуславливают необходимость определения толщины и структуры приповерхностного слоя в пластинах кремния после ХМП.

Цель настоящей работы – определение глубины субмикронных приповерхностных повреждений на различных стадиях (съема и финишного полирования) при двухстороннем химико-механическом полировании. Для оценки глубины приповерхностных повреждений применялась методика осесимметричного изгиба, описанная в [4] и использованная в [5] для оценки глубины повреждений в пластинах кремния, возникающих после первой стадии (съема) при одностороннем ХМП. Глубина приповерхностных повреждений оценивалась по максимальной величине критического размера зародышевой трещины. Критический размер зародышевой трещины  $a_{кр}$  (или эквивалентного по размеру микродефекта, находящегося вблизи поверхности, подвергнутой действию напряжения растяжения и служащего концентратором напряжений) определяется по известному соотношению Гриффитса [4]:

$$a_{кр} = K_{Ic}^2 / \pi \sigma_p^2, \quad (1)$$

где  $K_{Ic}$  – трещиностойкость кремния, равная  $1,03 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  для Si (100);  $\sigma_p$  – разрушающее напряжение. Плотность ОДУ определялась по известной методике [6] в монокристалле кремния (на толстых пластинах кремния – шайбах), в пластинах кремния после первой стадии (съем) и второй стадии (финишное полирование) ДХМП. Отметим, что все эксперименты по отработке технологии ДХМП [1, 2] осуществлялись на пластинах, вырезанных из одного монокристалла кремния диаметром 150 мм марки КДБ-12 с ориентацией оси роста в направлении  $\langle 100 \rangle$ . В настоящей работе использовали ДХМП-пластины кремния, полученные в результате технологических экспериментов.

Для определения разрушающего напряжения по методике осесимметричного изгиба из каждой пластины после первой и второй стадий ДХМП методом дискового разрезания нарезали образцы размером  $5 \times 5 \text{ мм}$ . Испытаниям подвергали не менее 70 таких образцов. Определяли медианное значение напряжения [4]. Значения медианных разрушающих напряжений  $\sigma_p$  и максимальные значения критического размера зародышевых трещин  $a_{кр}$ , рассчитанные по соотношению (1), даны в таблице. Там же приведены данные по средней плотности ОДУ для первой и второй стадий ДХМП.

**Значения разрушающих напряжений и критический размер зародышевой трещины в кремнии после различных стадий полирования при ДХМП**

Параметр	Стадии полирования	
	Первая	Вторая
Разрушающее напряжение $\sigma_p$ , ГПа	0,59	1,21
Максимальный размер критической зародышевой трещины $a_{кр}$ , мкм	0,97	0,23
Плотность ОДУ $N_{ОДУ}$ , $\text{см}^{-2}$	$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^1$

На основании этих данных можно утверждать, что максимальное значение приповерхностных повреждений после первой стадии составляет 0,97 мкм, а после второй – 0,23 мкм. Это соответствует максимальным значениям глубины приповерхностных повреждений, обнаруженных методом просвечивающей электронной микроскопии тонких фольг поперечных сечений образцов после первой и второй стадий при одностороннем ХМП [7]. Отметим, что среднее значение плотности ОДУ коррелирует со значениями  $a_{кр}$ . После первой стадии ДХМП средняя плотность ОДУ составляет  $3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$  и снижается на два порядка после финишного полирования. Средняя плотность ОДУ в монокристалле кремния составляла  $7 \cdot 10^0 \text{ см}^{-2}$ . ОДУ упаковки в монокри-



сталле кремния были распределены достаточно равномерно. В исходных монокристаллах кремния не обнаружена свирлевая или иная кольцевая неоднородность. Отношение плотности ОДУ после финишной стадии ДХМП к плотности ОДУ в монокристалле кремния составляет 4,3, т.е. процесс ДХМП привносит в 4,3 раза больше дефектов, служащих центрами зарождения ОДУ, чем исходный монокристалл. Это отношение находится в пределах от 1,5 до 5,0 [8].



GeoMap-150/S ITAR Ltd.

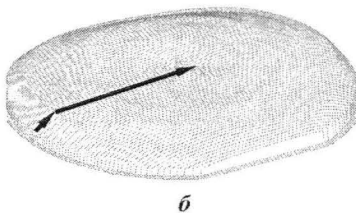


Рис.1. Неоднородность распределения плотности дефектов упаковки: *a* – по полям зрения от края пластины к центру; *b* – в направлении сканирования

На ДХМП-пластинах обнаружена аномалия в распределении ОДУ вдоль диаметра исследуемых пластин, особенно заметная после первой стадии ДХМП (рис.1). На краю пластины наблюдается пик плотности ОДУ (рис.1,*a*). Примерно на первых 10 мм от края пластины плотность ОДУ возрастает на порядок величины, а на последующих 10 мм уменьшается до среднего значения  $3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ . Это соответствует профилю поверхности пластины (рис.1,*b*) в направлении сканирования. Изображение профиля поверхности пластины кремния получено с помощью программно-аппаратного комплекса «ГеоМэп ТПК-300» производства фирмы «ИТАР» г. Москва (аналог установки ADE). Обнаружено существенно меньшее значение толщины пластины в пределах первых 6–8 мм сканирования от края пластины (см. рис.1,*b*). Другими словами, скорость съема на краю пластины на первой стадии ДХМП намного больше,

чем в центре пластины. По мнению авторов, это явление, описанное ранее в [9, 10] и названное «roll off», является неотъемлемым элементом процесса ДХМП. Для определения «roll off» вводятся два понятия: 1) ROA (roll off amount), которое определяется смещением по оси *Z* от плоскости поверхности сравнения на расстояние *X* от края пластины, равное 1 мм; 2) ROS (roll off starting point), которое определяется расстоянием от края пластины вдоль оси *X*, когда вертикальное смещение *Z* от плоскости поверхности сравнения становится равным нулю. Последняя характеристика соответствует значениям нахождения максимума ОДУ (~10 мм на рис.1,*a*) и расстояния от края пластины с уменьшенным значением толщины пластины (~6–8 мм на рис.1,*b*).

Большое значение ROS в проведенном эксперименте уменьшает долю полезной площади с высокими значениями плоскостности. Согласно [10] снижение ROS до 1 мм может быть достигнуто путем приближения толщины сепараторов к значению окончательной толщины пластины. Различия должны составлять не более 5 мкм. В нашем случае большое значение ROS обусловлено тем, что разница в окончательной толщине пластины после первой стадии ДХМП и толщиной сепаратора составляла 25 мкм.

В результате проведенных исследований определены значения максимальной глубины приповерхностных повреждений после первой и второй стадий процесса ДХМП, которые составили 0,97 мкм и 0,23 мкм соответственно. Обнаружена хорошая корреляция между глубиной приповерхностных повреждений после первой и второй стадий ДХМП и плотностью ОДУ. Таким образом, плотность ОДУ также может служить

критерием степени повреждений поверхности и глубины приповерхностных повреждений. Аномально высокое значение плотности ОДУ на краю пластины при однородном их распределении в исходном монокристалле после первой стадии ДХМП объясняется особенностями процесса ДХМП, а именно более высокой скоростью съема на краю пластины из-за большой разницы между окончательной толщиной полированных пластин и толщиной применяемых сепараторов.

Авторы выражают благодарность Арбениной В.В. за предоставленную возможность работы на установке осесимметричного изгиба и Дьякову А.М. за проведение измерений профиля поверхности пластин кремния на установке «ГеоМэп ТПК-300».

### Литература

1. Соловей В.В., Литвинов Ю.М., Хохлов А.И., Яковлев С.П. Процесс двухстороннего химико-механического полирования пластин кремния // Изв. вузов. Электроника. – 2004. – № 6. – С. 26–30.
2. Соловей В.В., Раскин А.А., Литвинов Ю.М., Хохлов А.И., Яковлев С.П. Двухстороннее химико-механическое полирование пластин кремния увеличенного диаметра – этап в освоении субмикронной технологии СБИС и УБИС // Материалы X Междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России (Материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники)» (Москва, ОАО ЦНИТИ «Техномаш», 2004, 9–11 сентября). – М.: ОАО ЦНИТИ «Техномаш», 2004. – С. 173–177.
3. ITRS – International Technology Roadmap for Semiconductors. – 2002. – С. 48.
4. Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Е.А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. – М.: Радио и связь, 1982. – 240 с.
5. Litvinov Yu.M., Makarov A.S. Mechanical strength of back-side thinning silicon device-fabricated wafers // Proc. of the Seventh scientific and business conf. «Silicon 2000» (Roznov pod Radhostem, Czech Republic, November 7–10<sup>th</sup>, 2000). TECON Scientific, november 2000. – P. 23–25.
6. ASTM Standards Book. – 2002. – Vol. 10.05. Standard ASTM F1727-02.
7. Litvinov Yu.M., Litvinov M.Yu., Makarov A.S., Pavlov V.P. Diagnostics of submicron subsurface damages in chemical-mechanical polished silicon wafers // Proc. of the Eighth scientific and business conf. «Silicon 2002» (Roznov pod Radhostem, Czech Republic, November 5–8<sup>th</sup>, 2002). TECON Scientific, november 2002. – P. 155–158.
8. Litvinov Yu., Makarov A., Petrov S., Svetlakova M., Yakovlev S. Oxidation test application for chemical-mechanical polished silicon wafers quality control // Proc. of the fourth int. conf. «Single Crystal Growth and Heat&Mass Transfer» (ICSC-2001) (Obninsk, Russia, 2001). – 2001. – Vol. 3. – P. 605–612.
9. Masahiro Kimura, Yasuo Saito, Hiroshi Daio, Kenji Yakushui. A new method for the precise measurement of wafer roll off of silicon polished wafer // Jpn. J. Appl. Phys. – 1999. – Vol. 38. – P. 38, 39.
10. Doubleside polishing – a technology mandatory for 300 mm wafer manufacturing / Wenski G., Altmann T., Winkler W. et al. // Mater. Sc. in Semicond. proc. 5. – 2003. – N 4–5. – P. 375–380.

Статья поступила  
20 декабря 2004 г.

**Соловей Василий Васильевич** – аспирант базовой кафедры технологий материалов электронной техники МИЭТ. *Область научных интересов:* технологии финишных процессов обработки поверхности полупроводниковых материалов.

**Литвинов Юрий Михайлович** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела разработки технологических проектов ОАО «ЭЛМА». *Область научных интересов:* материаловедение полупроводников и методы исследования структуры материалов.

# ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.396

## Технология прецизионного монтажа на полиимидных платах

*А.М.Грушевский, С.Н.Семенов, П.А.Жуков, В.В.Карвасарный*

**Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)**

Обоснованы оптимальные режимы прецизионного монтажа многовыводных БИС на полиимидных платах. Экспериментально установлено, что предпочтительным является метод односторонней контактной сварки сдвоенным электродом, обеспечивающий высокую прочность и стабильность контактного соединения. Проведена оценка температуры при микроконтактировании, определяющей прочность контактного соединения. Экспериментальные результаты указывают на адекватность расчетной модели.

В настоящее время широкое использование при разработке электронных средств получили гибкие платы, что обусловлено возможностью создания прецизионных многослойных структур, способных к свертыванию в трех плоскостях, принятию формы корпуса сложной конфигурации при монтаже. Кроме того, высокая стойкость к перегибам и ударопрочность, малые габариты и вес таких плат обеспечивают их несомненную перспективность при создании высокоинтегрированных ячеек и блоков как наземной, так и бортовой микроэлектронной аппаратуры.

Применение гибких плат снижает трудоемкость монтажа на 40–45%, уменьшает вес и габариты изделия на 30–50%, обеспечивая при этом повышение быстродействия изделий на 20–30% по сравнению с аналогичными образцами, собранными по традиционной технологии поверхностного монтажа на печатных платах [1].

Широкому внедрению гибких плат способствовала разработка и использование полиимидной пленки с высокой (до 570 К) температурой устойчивой работы. Полиимидная пленка обладает хорошими электрическими и физико-механическими свойствами. Низкий тангенс угла диэлектрических потерь (0,002) и относительная диэлектрическая проницаемость  $\sim 3,0$  на частотах вплоть до гигагерц отвечают требованиям к материалам, используемым при создании быстродействующих структур. Возможность тонкопленочной металлизации в вакууме наряду с высокой химической и радиационной устойчивостью обеспечивают применимость полиимидной пленки при создании многокристальных модулей (МКМ), являющихся одним из основных направлений современного высокоплотного монтажа. Технология создания таких МКМ на основе многослойных полиимидных плат и бескорпусных СБИС с организованными выводами как в двумерном, так и трехмерном исполнении интенсивно развивается и является весьма перспективной.

Определяющим процессом рассматриваемой технологии является прецизионный монтаж выводов кристалла на облуженные контактные площадки многослойных полиимидных плат. Технологическими решениями процесса монтажа определяется возмож-



ность создания высокоплотных структур с повышенным быстродействием на основе надежных микроконтактных соединений.

Технический анализ проблемы позволяет заключить, что микромонтаж на полиимидных платах обусловлен рядом особенностей: невозможность применения ультразвуковой сварки из-за сложности передачи энергии в зону контактного узла; монтаж ограничен по температуре (более 673 К возможна термодеструкция полиимида); затруднен процесс общей термокомпрессии из-за возможного расплавления легкоплавкого покрытия по всей поверхности платы.

При монтаже важно обеспечение температурного режима, так как в этом конструктиве распространение теплового импульса происходит практически только по плоскости полиимидной платы (толщина платы ~ 40 мкм), а полиимид характеризуется достаточно низким коэффициентом теплопроводности (~ 0,04 Вт/(м·К)). Неверно выбранные тепловые импульсы при монтаже и неправильный учет теплостока могут привести к некачественному сварному соединению: снижению прочности, отслоению контактных площадок (КП), вызванному локальной термодеструкцией полиимида, вплоть до нарушения конструктивной целостности изделия (прожоги и т.п.).

Таким образом, технически наиболее целесообразным для выполнения монтажа выводов гибких носителей кристаллов на полиимидную плату представляется применение процессов, протекающих при невысоких и кратковременных температурных воздействиях и давлении. Этим условиям достаточно хорошо отвечают методы микроконтактирования односторонней контактной сварки или сварки косвенным импульсным нагревом [2].

Как односторонняя контактная сварка, так и сварка косвенным импульсным нагревом (СКИН) обеспечивают локальный кратковременный разогрев контактного узла. Выполненные исследования прочности контактных узлов, сформированных СКИН, односторонней контактной сваркой сдвоенным электродом (электрод из молибдена с зазором 40–60 мкм) и пайкой микропаяльником, указывают на предпочтение использования сварки сдвоенным электродом (таблица). При этом монтаж алюминиевых выводов с паяемыми микровыводами (ПМВ) гибкого носителя на облуженные контактные площадки коммутационной полиимидной платы характеризуется наиболее стабильными результатами – наибольшая прочность при наименьшей дисперсии.

**Прочность соединения в зависимости от способа контактирования**

Способ контактирования	Усилие отрыва $F_{ср}$ , Н	Дисперсия $\sigma$ , Н	Метод испытания
Исходное состояние (ПМВ на выводе гибкого носителя)	0,77	0,12	Сдвиг
Односторонняя контактная сварка сдвоенным электродом:			
– монтаж с КП гибкой платы	0,22	0,02	Отрыв
– имитация	0,77	0,12	Сдвиг
СКИН:			
– монтаж с КП гибкой платы	0,20	0,03	Отрыв
– имитация	0,74	0,12	Сдвиг
Пайка микропаяльником:			
– монтаж с КП гибкой платы	0,20	0,04	Отрыв
– имитация	0,73	0,12	Сдвиг

*Примечание.* Имитация проводилась в оптимальных рабочих режимах для каждого способа (как и непосредственно пайка) на алюминиевую пластину. Прочность на отрыв определялась под углом 90° к поверхности платы, а на сдвиг – под углом 45°.

Анализ микросоединений, сформированных сваркой сдвоенным электродом, указывает на большую площадь контактного взаимодействия припоя с ПМВ за счет большей высоты подъема (галтели) припоя. При этом существенно, что высота припоя характеризуется достаточной стабильностью – нет случаев «сплошного утапливания» ПМВ в припое контактной площадки (наблюдаемым при пайке микропаяльником) и исключен тем самым эффект расклинивания.

Образование микросоединений при монтаже происходит не в твердой фазе соединяемых материалов, а с образованием жидкой фазы финишного покрытия КП, смачивающего ПМВ (как правило, Au-шарик) в процессе бесфлюсовой импульсной сварки-пайки. При прохождении импульса тока через монтажный инструмент происходит расплавление и подъем жидкой фазы припойного покрытия за счет сил смачивания, при этом высота подъема зависит от мощности импульса, задающего температуру в зоне контакта.

Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с работами, связывающими механизмы подъема жидкой фазы припоя по боковой поверхности проводника при бесфлюсовом контактировании сдвоенным электродом не только за счет сил поверхностного натяжения, но и за счет сил электромагнитного взаимодействия.

Согласно [3] силу взаимодействия между проводниками длиной  $l$ , расположенными под сдвоенным электродом, можно определить в виде

$$F = \frac{2\mu_0\mu_v I_1 I_2}{d} \left( \sqrt{(l^2 + d^2)} - d \right), \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mu_v$  – магнитная проницаемость воздуха;  $I_i$  – ток в соответствующем проводнике;  $d$  – расстояние между проводниками.

Для рассматриваемого случая  $l = 150$  мкм,  $d$  находится в диапазоне от 0,5–1,0 мкм и, принимая  $I_{пр}/I_y \approx 0,15$ , где  $I_{пр}$  – ток припоя;  $I_y$  – ток узла алюминиевый вывод–ПМВ, оценочно получаем  $F = 0,3$  Н.

Не исключается также возможность силы пинч-эффекта (стремление сжать проводник, по которому протекает ток). Протекающий в проводнике ток  $I_n$  можно рассматривать как сумму единичных токов, что характерно для монтажного узла при сварке сдвоенным электродом:  $I_n = I_{Al} + I_{ПМВ} + I_{пр} + I_{Cu}$ . В проводнике за счет взаимодействия элементарных токов возникает сила, направленная к центру (внутри проводника создается давление на единицу поверхности) [4]:

$$F = 1,02 \cdot 10^{-8} \mu_0 \mu_{пр} \frac{I^2}{\pi R^4} (R^2 - r^2), \quad (2)$$

где  $\mu_{пр}$  – магнитная проницаемость проводника;  $R$  – радиус проводника;  $r$  – расстояние от центра проводника до места приложения силы.

В твердых проводниках силы (1) и (2) проявляются слабо. Однако при наличии жидкой фазы, расплавлении одного из проводников за счет теплового импульса, как в рассматриваемом случае, эти силы проявляются значительней, так как сопротивляемость жидкого металла к механическому воздействию снижается.

Для оценки оптимальных температурных условий сварки на практике целесообразно применение расчетных математических моделей.

В качестве исходного уравнения для расчета тепловых процессов при сварке в условиях однородности среды [5] используется уравнение Фурье, описывающее распространение тепла в неограниченном теле:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (3)$$

где  $t$  – время после воздействия источника тепла – сварочного импульса, с;  $T$  – температура, К;  $x, y, z$  – координаты точки тела;  $a$  – коэффициент температуропроводности, характеризующий скорость распространения в

теле изотермы с заданной температурой,  $a = \lambda (c\rho)^{-1}$ . Здесь  $c$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – удельная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К).

Допуская, что время распространения тепла связано с глубиной (толщиной) пластины  $X$ , на которой температура за время  $t$  составит 0,9 температуры на поверхности пластины, соотношением  $X = 0,12 \sqrt{\left(\frac{\lambda}{c\rho}\right) t}$

[6], будем рассматривать сварку как воздействие мгновенного линейного источника тепла  $Q$  на пластину толщиной  $h$ . В процессе распространения тепла от линейного источника температура в любой точке пластины будет оставаться одинаковой по толщине.

Уравнению (3) при изложенных допущениях и начальном условии  $T|_{t=0} = Q / c\rho dV$  (в случае линейного источника единицу объема получаем наложением процессов бесконечного числа точечных источников, которые располагаются вдоль оси  $OZ$ ) удовлетворяет решение в виде:

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi a c\rho t} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{4at} - bt\right), \quad (4)$$

где  $r$  – расстояние от источника, м;  $b$  – коэффициент температуропотдачи, учитывающий интенсивность понижения температуры вследствие поверхностной теплоотдачи в окружающую среду в секунду,  $b = 2\alpha(c\rho h)^{-1}$ . Здесь  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Сомножитель  $e^{-bt}$  в выражении (4) учитывает влияние теплоотдачи граничных поверхностей. Чем меньше толщина  $h$  пластины, тем больше влияние теплоотдачи в окружающую среду и тем значительнее коэффициент  $b$ , учитывающий эту теплоотдачу. Выражение (4) представляет собой функцию Грина для уравнения параболического типа. Температурное поле является плоскорадиальным.

Количество тепла  $Q$  в (4) при микросварке сдвоенным электродом с учетом закона Джоуля–Ленца описывается выражением  $Q = 0,238 \frac{U^2}{R} \tau \eta$ , где  $U$  – подводимое напряжение, В;  $R$  – сопротивление контактного узла, Ом;  $\tau$  – длительность импульса, с;  $\eta$  – коэффициент полезного действия источника.

На рис.1 представлено характеристическое распределение температуры в пределах размеров контактной площадки на полиимидной плате при односторонней контактной сварке сдвоенным электродом при фиксированном времени после сварочного импульса.

Таким образом, принимая, что температура припоя в зависимости от подводимой мощности определяется для контактной сварки сдвоенным электродом через напряжение, исследованы зависимости прочности сварного соединения от напряжения при фиксированных значениях длительности импульса и давления инструмента. Типичные зависимости носят экстремальный характер. Так, при малых значениях напряжения

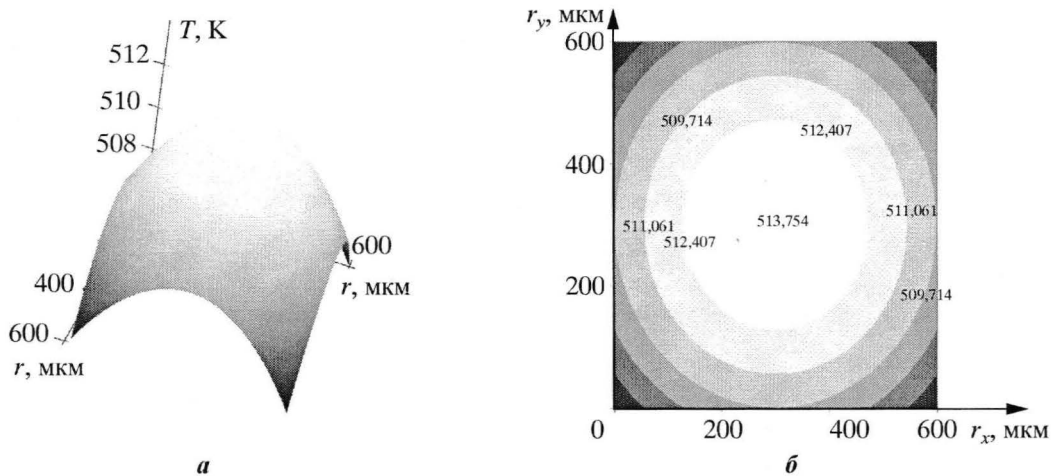


Рис.1. Характеристическое распределение температуры в пределах контактной площадки (600×600 мкм) на полиимидной плате при односторонней контактной сварке сдвоенным электродом: а – изометрия распределения температуры; б – градиент температуры по осям (номинал температуры указан по полю рисунка)



не обеспечивается необходимая температура и, как следствие, прочность невысокая. С увеличением напряжения до 50–70 В температура достигает 523 К и сварные соединения на контактных площадках в широком диапазоне размеров (от 150×150 до 600×600 мкм) характеризуются высокой прочностью. При больших значениях напряжения (110–120 В) из-за резкого повышения температуры (до 693 К и более) прочность снижается, вплоть до отслоений контактных площадок, вызванных локальной термодеструкцией полиимида, на что указывает потемнение полиимида под контактной площадкой [6]. Оптимальными параметрами процесса сварки приняты: напряжение 50–70 В, время сварки 0,04–0,05 с, усилие нагружения (давление) 0,5–0,6 Н.

Оптимальные параметры, полученные с использованием расчетной тепловой модели, достаточно хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Для измерения температуры на плате в эксперименте использованы термоиндикаторные краски, которые обеспечивают точность измерения  $\pm 0,5$  К.

Выполненные исследования показали, что с целью обеспечения высокой прочности контактного соединения наилучшим для монтажа на полиимидных платах является метод контактной односторонней сварки сдвоенным электродом. Качество контактного соединения во многом определяется температурным режимом. Этот метод обеспечивает возможность реализации прецизионного монтажа БИС на полиимидные платы с шагом контактных площадок до 300 мкм при размере площадок не более 150×150 мкм, что отвечает требованиям современного высокоплотного монтажа электронных средств.

### Литература

1. *Грушевский А.М.* Сборка и монтаж многокристалльных модулей: Учеб. пособие / *Под ред. Л.А.Коледова.* – М.: МИЭТ, 2003. – 196 с.
2. *Назаров Г.В., Гревцев Н.В.* Сварка и пайка в микроэлектронике. – М.: Сов. радио, 1969. – 192 с.
3. *Хэг Б.* Электромагнитные расчеты: Пер. с англ. П.В.Борисоглебского. – М. – Л., Госэнергоиздат, 1934. – 306 с.
4. *Алов А.А.* Основы теории процессов сварки и пайки. – М.: Машиностроение, 1964. – 272 с.
5. *Рыкалин Н.Н., Узлов А.А., Анищенко Л.М.* Высокотемпературные технологические процессы. Теплофизические процессы. – М.: Наука, 1986. – 172 с.
6. *Жуков П.А., Карвасарный В.В.* Исследование тепловых процессов при монтаже БИС на полиимидной плате // 11-я Всероссийская межвузовская науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2004» (21–23 апреля 2004 г.). – М.: МИЭТ, 2004. – 10 с.

Статья поступила  
15 февраля 2005 г.

**Грушевский Александр Михайлович** – доктор технических наук, профессор кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* твердотельная электроника, технология сборки и монтажа микросистем.

**Семенов Сергей Николаевич** – аспирант кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* сборочно-монтажные процессы электронных средств.

**Жуков Павел Александрович** – инженер кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование и технология электронных средств.

**Карвасарный Владимир Валентинович** – аспирант кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование и технология электронных средств.

## Исследование механизма переключения в слоях $n\text{CdTe:In}$

Э.А.Сенокосов, А.Л.Макаревич, В.В.Сорочан

Приднестровский государственный университет  
(г. Тирасполь, Молдова)

Приведены результаты исследования переключения  $S$ -типа в толстых поликристаллических слоях  $n\text{CdTe:In}$ . Показано, что в основе электрической неустойчивости слоев лежит механизм электронно-теплого пробоя. Зависимость пороговых параметров переключения от интенсивности засветки может быть использована для создания на основе слоев  $n\text{CdTe:In}$  электрических переключателей, управляемых ИК-светом.

Полупроводниковые соединения  $A_2B_6$  используются для изготовления солнечных элементов, детекторов радиационных излучений, приборов инфракрасного спектра и др. Расширение диапазона применения этих и других приборов стимулирует поиск новых принципов их работы. Известно [1–4], что под действием сильного электрического поля массивные кристаллы и тонкие пленки  $\text{CdTe}$  могут переключаться из высокоомного состояния в низкоомное. При этом наблюдаются ВАХ  $S$ -типа. Однако полное представление о механизме такого переключения в образцах  $\text{CdTe}$  отсутствует.

В настоящей работе приведены результаты исследования электрического переключения  $S$ -типа в поликристаллических слоях  $n\text{CdTe:In}$  толщиной 20–500 мкм и сопротивлением  $10^3$ – $10^6$  Ом·см. Слои получали на стеклянных подложках методом вакуумного осаждения в квазизамкнутом объеме. Легирование мелкими донорами осуществлялось путем соиспарения примеси индия.

В качестве невыпрямляющих контактов к слоям  $n\text{CdTe:In}$  применялись пленки  $\text{In}$ , наносимые методом вакуумной конденсации на свободную поверхность с межконтактным зазором, равным 1 мм. ВАХ образцов  $\text{In}-n\text{CdTe:In}-\text{In}$  исследовались в вакууме при комнатной температуре в динамическом режиме с использованием синусоидального напряжения с частотой 50 Гц и в стационарном режиме. Кинетика переключения изучалась с помощью генератора прямоугольных импульсов и осциллографа. Использовались импульсы длительностью 0,5–65 мс, частотой 7 Гц–1 кГц и амплитудой 200 В.

Все исследованные образцы  $\text{In}-n\text{CdTe:In}-\text{In}$  имели симметричные ВАХ, на которых отсутствовала вторая поворотная точка перехода к положительному дифференциальному сопротивлению в области больших токов. Переключение в низкоомное состояние происходило скачком. Время переключения составляло порядка  $10^{-3}$  с. Последующие  $S$ -переключения образцов  $\text{In}-n\text{CdTe:In}-\text{In}$  (рис.1) происходили при меньших напряжениях (кривые 1, 2) с переходом после 4–5 циклов переключения в установившееся состояние (см. рис.1, кривая 3). В этом состоянии пороговые параметры переключения (напряжение  $U_p$ , ток  $I_p$ ) не менялись от цикла к циклу. Однако обратный ход ВАХ не совпадал с ВАХ прямого хода (см. рис.1, кривые 3, 4).

ВАХ образцов  $\text{In}-n\text{CdTe:In}-\text{In}$ , снятые в стационарном режиме в области напряжений  $U < (15\text{--}35)$  В, имели линейную зависимость тока от напряжения. С дальнейшим увеличением  $U$  эта зависимость становилась сверхлинейной с переходом к

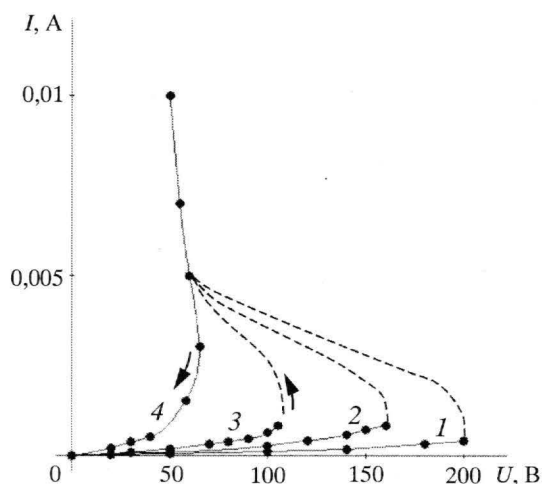


Рис.1. Стационарные ВАХ при 300 К образца In-nCdTe:In-In: 1 – первое переключение; 2 – второе переключение; 3 – переключение в установившемся состоянии; 4 – обратный ход ВАХ образца в установившемся состоянии

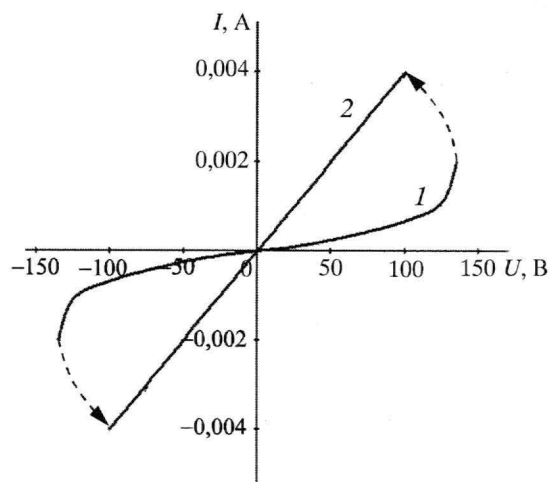


Рис.2. ВАХ образца In-nCdTe:In-In при 300 К для установившегося состояния в динамическом режиме: 1 – высокоомное состояние, 2 – низкоомное состояние

экспоненциальной форме  $I = U/R_0 \cdot \exp[U/U_0]$ , сохраняющейся вплоть до напряжения переключения, где  $R_0$  и  $U_0$  – параметры, имеющие размерность сопротивления и напряжения соответственно. Значения  $U_0$  определялись из наклона ВАХ, перестроенных в координатах  $\ln(I/U)$ ,  $U$ .

На рис.2 приведена ВАХ образца In-nCdTe:In-In, снятая для установившегося состояния в динамическом режиме (кривая 1). На начальном участке такой ВАХ также наблюдается линейная зависимость, переходящая при дальнейшем увеличении  $U$  к экспоненциальной форме:

$$I(t) = (U(t)/R_0) \cdot \exp[|U(t)/U_0|], \quad (1)$$

где  $I(t)$  и  $U(t)$  – ток и напряжение как функции времени  $t$ . В низкоомном (переключенном) состоянии ВАХ характеризовались линейной зависимостью (см. рис.2, кривая 2).

Известно, что о тепловом действии переменного тока судят по эффективным значениям напряжения и тока. В наших исследованиях напряжение на образце изменялось по закону  $U(t) = U_a \sin(\omega t)$ , где  $U_a$  – амплитудное значение напряжения,  $\omega$  – его циклическая частота. Изменение тока с напряжением для значений, близких к амплитудному значению тока переключения  $I_p^a$ , описывается формулой (1). Для такого закона изменения напряжения и тока их эффективные значения определяются соотношениями

$$U_{\text{эфф}} = U_a / \sqrt{2}, \quad (2)$$

$$I_{\text{эфф}} = I_a \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sin(\omega t) \cdot \exp[2 \frac{U_a}{U_0} (\sin(\omega t) - 1)] dt}, \quad (3)$$

где  $I_a$  – амплитудное значение тока;  $T$  – период его колебаний.

Зависимость отношения  $I_{\text{эфф}}/I_a$  от величины  $U_a/U_0$ , рассчитанная по формуле (3), представлена на рис.3. Здесь же точками отмечены экспериментальные результаты зависимости  $I_p/I_p^a$  от  $U_a/U_0$  для образцов In-nCdTe:In-In, отличающихся степенью



легирования и толщиной. Видно, что экспериментальная зависимость  $I_p/I_p^a$  от  $U_a/U_0$  хорошо согласуется с теоретически рассчитанной зависимостью  $I_{\text{эфф}}/I_a = f(U_a/U_0)$ .

Основные параметры образцов, а также отношения напряжений переключения в стационарном  $U_p$  и динамическом  $U_p^a$  режимах представлены в таблице. Измерения проводились в условиях установившихся состояний. Оказалось, что экспериментальные значения отношений  $U_p/U_p^a$  согласуются со значением

$U_{\text{эфф}}/U_a = 1/\sqrt{2}$ . Иными словами, для всех образцов значения напряжения переключения в стационарном режиме близки или совпадают с эффективным значением переменного напряжения переключения в слоях  $n\text{CdTe:In}$ . Такая закономерность в совокупности с токовой корреляцией (см. рис.3) свидетельствует о тепловом характере  $S$ -переключения в исследованных слоях  $n\text{CdTe:In}$ .

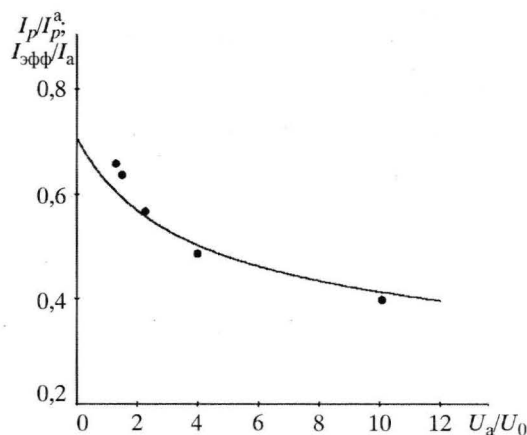


Рис.3. Зависимость  $I_{\text{эфф}}/I_a$  от  $U_a/U_0$   
(• – эксперимент)

#### Основные параметры образцов $\text{In-nCdTe:In-In}$

Параметры	Образец				
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5
Толщина слоев $n\text{CdTe:In}$ , мкм	260	170	120	55	20
Омическое сопротивление (1-е переключение), Ом · см	$10^3$	$4 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^4$
$I_p/I_p^a$	0,64	0,4	0,57	0,45	0,66
$U_p/U_p^a$	$1/\sqrt{1,9}$	$1/\sqrt{2,1}$	$1/\sqrt{1,7}$	$1/\sqrt{1,8}$	$1/\sqrt{2,2}$

Тепловой механизм переключения  $S$ -типа проявляется, если концентрация основных носителей заряда (НЗ) достаточно быстро возрастает с температурой кристалла за счет джоулева тепла. Такой механизм может стать преобладающим в случае плохого теплоотвода. Действительно, пороговые параметры перехода образцов  $\text{In-nCdTe:In-In}$  в низкоомное состояние зависели от условий теплоотвода. Установлено, что образцы, полученные из слоев  $n\text{CdTe:In}$  на сапфировых подложках в таких же технологических условиях, что и на стеклянных подложках, переключались при значении джоулевой мощности, в 5 раз превосходящей ее значение для слоев  $n\text{CdTe:In}$  на стеклянных подложках. Это обусловлено тем, что коэффициент теплопроводности сапфира почти в 40 раз превышает его значение для стекла [5].

В случае, когда температура решетки зависит от джоулевой мощности, выражение для дифференциальной проводимости полупроводника имеет вид [6]

$$\sigma_d = \frac{dj}{dE} = en\mu \left[ 1 + \frac{jE}{\beta T} \frac{d(\ln n)}{d(\ln T)} \right] \left[ 1 - \frac{jE}{\beta T} \frac{d(\ln n)}{d(\ln T)} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $n$  и  $\mu$  – концентрация и подвижность основных НЗ;  $T$  – температура решетки кристалла;  $j$  – плотность тока;  $E$  – напряженность электрического поля;

$\beta = \frac{d(jE)}{dT}$ . Из (4) следует, что изменение знака  $\sigma_d$ , приводящее к S-образной ВАХ, может быть связано с изменением знака знаменателя из-за быстрого роста  $n$  при изменении температуры кристалла за счет джоулева разогрева. При этом, если температурная зависимость концентрации основных НЗ имеет стандартную форму  $n(T) \sim T^{3/2} \cdot \exp[-\Delta E/kT]$ , где  $\Delta E$  – энергия активации, то знак знаменателя в (4) может измениться только один раз. На таких ВАХ будет отсутствовать переход к положительной дифференциальной проводимости в области больших токов. Такая особенность характерна для ВАХ исследованных образцов In-*n*CdTe:In-In (см. рис.1).

В случае теплового пробоя напряжение переключения с ростом температуры окружающей среды должно изменяться по экспоненциальному закону [7]. В образцах же In-*n*CdTe:In-In наблюдалась линейная зависимость напряжения переключения от температуры (рис.4), свойственная для электронно-теплового механизма [7].

Параметры переключения образцов In-*n*CdTe:In-In можно было изменять путем их засветки интегральным светом (рис.5). При этом напряжение переключения уменьшалось и тем быстрее, чем выше была интенсивность засветки (см. рис.5, кривые 1–3). Ток переключения при этом возрастал так, что джоулева мощность переключения оставалась постоянной для различных уровней засветки. Установлено, что оптически активной для слоев *n*CdTe:In являлась область спектра, соответствующая краю их собственного поглощения. Однако в низкоомном (переключенном) состоянии образцы In-*n*CdTe:In-In становились не чувствительными к такому свету.

Чтобы выяснить, в объеме или на поверхности развиваются процессы, ответственные за ВАХ S-типа слоев *n*CdTe:In, переключающие образцы подвергались травлению в растворе 1Н КОН в метаноле. Стравливание их верхнего слоя толщиной до 3 мкм не приводило к заметному изменению параметров переключения. В пользу объемного характера явления может также свидетельствовать эффект переключения как в «планарных» образцах In-*n*CdTe:In-In, так и в «сэндвич»-структуре SnO<sub>2</sub>-*n*CdTe:In-In.

Слой CdTe *p*-типа проводимости, полученные в квазизамкнутом объеме в таких же температурных условиях, что и слой *n*CdTe:In, но не легированные примесью индия, имели сопротивление 10<sup>7</sup>–10<sup>9</sup> Ом·см и линейные ВАХ без переключения, вплоть до напряжений необратимого пробоя.

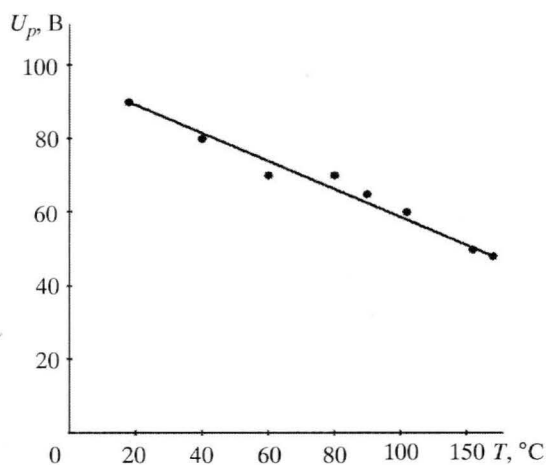


Рис.4. Зависимость напряжения переключения от температуры образца In-*n*CdTe:In-In

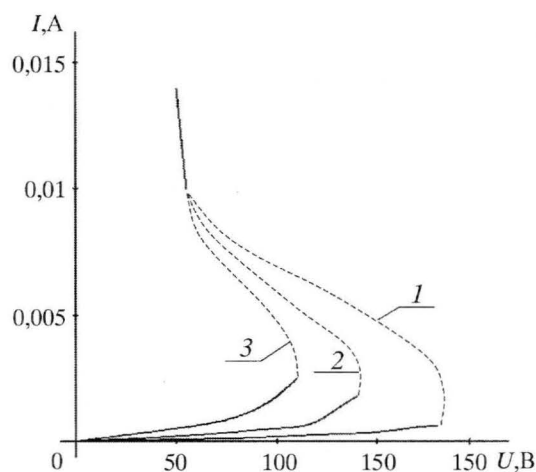


Рис.5. ВАХ образца CdTe:In при 300 К для различных интенсивностей засветки интегральным светом, лк: 1 – 0; 2 – 280; 3 – 500

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Особенности ВАХ поликристаллических слоев  $n\text{CdTe:In}$ , полученных в квазизамкнутом объеме на стеклянных подложках, указывают на то, что в основе их переключения  $S$ -типа лежит механизм электронно-теплого пробоя. Пороговые параметры перехода в низкоомное состояние во многом определяются условиями теплоотвода.

Явление  $S$ -переключения в образцах  $\text{In}-n\text{CdTe:In}-\text{In}$  носит объемный характер.

Параметрами переключения слоев  $n\text{CdTe:In}$  можно управлять путем их засветки светом из спектральной области, соответствующей краю собственного поглощения  $\text{CdTe}$ , что может быть использовано для создания на основе слоев  $n\text{CdTe:In}$  электрических переключателей, управляемых светом из ближней инфракрасной области.

### Литература

1. Дидковский А.П., Хиврич В.И. Эффекты переключения и памяти в  $\text{CdTe}$  // ФТП. – 1974. – Т. 8, № 5. – С. 990–992.
2. Палатник Л.С., Копач Г.И. Эффекты переключения и памяти в монокристаллических пленках  $\text{CdTe}$  // Микроэлектроника. – 1977. – Т. 6, Вып. 2. – С. 193–195.
3. Дымко Л.Н., Кица М.С., Лихобабин Н.П. Исследование эффекта переключения в монокристаллах  $\text{CdTe}$  // Физическая электроника. – 1987. – № 34. – С. 33–36.
4. Байдулаева А., Власенко А.И., Ломовцев А.В., Мозоль П.Е. Создание переключающих элементов с памятью на основе кристаллов  $\text{CdTe}$  // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2001. – № 3. – С. 36–37.
5. Таблицы физических величин: Справочник / Под. ред. И.К.Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1006 с.
6. Бонч-Бруевич В.Л., Звягин И.П., Миронов А.Г. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках. – М.: Наука, 1972. – 414 с.
7. Электронные явления в халькогенидных стеклообразных полупроводниках / Под.ред. К.Д.Цендина. – СПб.: Наука, 1996. – 486 с.

Статья поступила  
20 декабря 2004 г.

**Сенокосов Эдуард Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой твердотельной электроники и микроэлектроники Приднестровского государственного университета. *Область научных интересов:* исследование слоев и пленочных структур полупроводниковых соединений  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$  и разработка на их основе фоточувствительных  $p$ - $n$ -гетеропереходов, пленочных лазеров, позиционно-чувствительных фотоприемников, изучение в них процессов коллективного возбуждения неравновесных носителей заряда, физико-технологические исследования пленок стеклообразных полупроводников для опто-электронных устройств.

**Макаревич Александр Леонидович** – кандидат технических наук, доцент кафедры твердотельной электроники и микроэлектроники Приднестровского государственного университета. *Область научных интересов:* разработка КМОП СБИС и микроэлектронных устройств на их основе, исследование радиационных эффектов в КМОП СБИС.

**Сорочан Виталий Викторович** – преподаватель кафедры твердотельной электроники и микроэлектроники Приднестровского государственного университета. *Область научных интересов:* исследование слоев и пленочных структур полупроводниковых соединений  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$  и разработка на их основе фоточувствительных  $p$ - $n$ -гетеропереходов и позиционно-чувствительных фотоприемников.



## Алгоритм управления температурным режимом в быстрых термических процессах

*В.А.Бархоткин, Ю.П.Райнова, А.И.Терентьев, А.Ю.Райнов*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Представлен алгоритм минимизации температурного градиента подложки в реакторе для быстрых термических процессов за счет регулирования газодинамических условий. В системе управления использован лазерный измеритель оптической плотности газовых сред, схема управления построена по отклонению хода интерференционных полос на голографической интерферограмме контролируемого фазового объекта от эталонного распределения. Задача решена для условий, когда процесс протекает в окрестностях предписанных значений температурного режима.

Изотермический нагрев подложки и воспроизводимость температурного режима до настоящего времени являются актуальными проблемами при внедрении быстрых термических процессов, основанных на воздействии некогерентного ИК-излучения, в широкомасштабное промышленное производство [1–3]. В условиях равномерной облученности флуктуации температуры могут быть обусловлены изменением внутренней, внешней и эффективной эмиссионной способности подложки, нестационарностью быстрого термического процесса, эффектами «термической памяти» и спецификой локального тепло- и массообмена в реакторе, определяемой в значительной мере газодинамическими параметрами системы.

Представленный в настоящей работе алгоритм автоматического управления температурным полем подложки построен по результатам экспериментальных исследований, основан на оптимизации и контроле газодинамических условий в рабочей зоне реактора и призван обеспечить минимизацию отклонений температуры подложки от заданного уровня. Задача управления температурой подложки решена для условий, когда процесс протекает в окрестностях предписанных значений этого параметра.

При разработке системы управления использовался лазерный измеритель оптической плотности газовых сред, принцип работы которого основан на голографической интерферометрии фазовых объектов [4]. Применение когерентного излучения в качестве оптического зонда дает ряд очевидных преимуществ. Прежде всего, это возможность визуализации прозрачной среды, быстроедействие измерений, отсутствие инерционных погрешностей и влияния лазерного излучения на истинную картину объекта.

Для мониторинга оптической плотности газовой фазы применялся метод голографической интерферометрии в реальном времени [5, 6]. Использовалась двухлучевая оптическая схема с He–Ne-лазером ЛГН-222 в качестве источника когерентного излучения [2]. Регистрация изображений картин интерференции в реальном времени осуществлялась с помощью цифровой фотокамеры DSC-P31.

В качестве объекта исследований выбран однопозиционный радиально-симметричный реактор, предназначенный для осаждения из газовой фазы эпитаксиально-пленочных структур на подложках диаметром до 200 мм при воздействии некогерентного ИК-излучения (рис.1) [7]. Реактор состоит из двух частей – непосредственно реакционной камеры и рефлектора с излучателями. В качестве излучателей использовались вольфрамовые галогенные лампы. Оптический поток от излучателей к подложке проходит через кварцевый диск, который одновременно является крышкой реактора. Подложка располагалась горизонтально на кварцевых держателях, имеющих точечный контакт с ее поверхностью. Высота свободного пространства между подложкой и кварцевой крышкой реактора составляла 26 мм. Температура подложки измерялась в центре и на периферии с помощью термопар. Экспонирование газовой фазы излучением He – Ne-лазера осуществлялось через оптические стекла, вмонтированные в водоохлаждаемые фланцы в боковых стенках реактора.

Транспортирующие газы (водород, аргон; расход от 0,1 до 14 л/мин) подавались в реактор нормально к поверхности подложки из точечных отверстий диаметром 0,5 мм, расположенных на расстоянии 5 мм друг от друга по окружностям диаметром 102, 132 и 162 мм в нижнем фланце реактора. Выход газов осуществлялся через две полукольцевые трубки с отверстиями диаметром 1 мм, расположенными на расстоянии 5 мм друг от друга. Полукольцевые трубки размещались симметрично на высоте 12 мм от поверхности подложки.

Как показали предварительные исследования, температурный режим в реакторе при прочих постоянных факторах зависит от скорости газового потока. Эта зависимость в каждом конкретном случае проявляется по-разному. Определяющими факторами являются геометрия рабочей зоны, способ подачи газа.

Как известно, в голографии при цифровой обработке сигналов для трактовки отличия одного сигнала от другого может использоваться понятие расстояния [8]. В настоящей работе наблюдаемой переменной в системе автоматического регулирования была картина расположения интерференционных полос на голографической интерферограмме контролируемого объекта (объектная голограмма), регистрируемая в реальном времени. Отслеживание сдвига интерференционных полос на голографических интерферограммах проводилось с помощью измерения координат характерных точек интерференционных полос  $y_i$ , в которых интенсивность принимает экстремальные значения, т.е. разность фаз  $\varphi(x, y) = \pi n$ ;  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  [5, 6]. Рассматривались координаты  $y_i$  в радиальном направлении над подложкой в пределах сечения, ограниченного максимумом близлежащей к подложке интерференционной полосы. Распределение температуры в экспонируемом пространстве рассчитывалось по голографической интерферограмме, отражающей поле градиента показателя преломления газовой фазы [7].

За основу алгоритма регулирования температурного поля подложки путем программированного изменения скорости газового потока принята схема управления по отклонению хода интерференционных полос на объектной голографической интерферограмме от хода интерференционных полос на эталонной голографической интерфе-

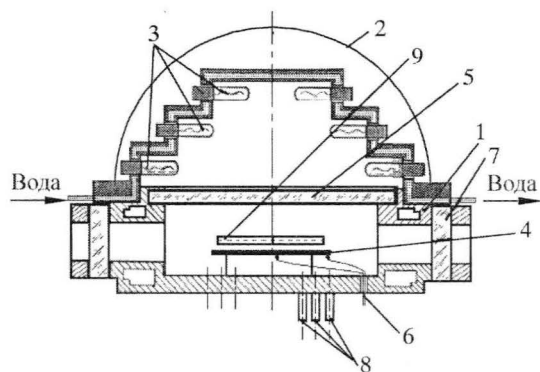


Рис.1. Схема реактора: 1 – корпус реактора; 2 – рефлектор; 3 – излучатели; 4 – подложка; 5 – кварцевый диск; 6 – термопары; 7 – оптические стекла; 8 – вход газа; 9 – полукольцевые трубки

программе состояния газовой фазы, зарегистрированной в аналогичной области экспериментальных условий, но при постоянной температуре подложки. В отличие от алгоритма минимизации температурного градиента подложки при быстром термическом воздействии [2], в котором была заложена идея сравнения реальной голографической интерферограммы контролируемого объекта с оптимальной, полученной расчетным путем исходя из условия постоянства плотности газовой фазы в рабочей зоне реактора вблизи поверхности подложки, предложенный алгоритм позволяет учесть суммарное влияние всех факторов, сопутствующих формированию температурного режима процесса. Это связано с тем, что сравниваемые голограммы в одинаковой степени отражают интегральные картины температурных полей в визуализированном пространстве. Обе голографические интерферограммы получают одним и тем же методом. Это позволяет пренебречь влиянием фоновых погрешностей и неконтролируемых возмущений.

Рассматриваемая структурная схема автоматизированной системы контроля газовых потоков в быстрых термических процессах аналогична схеме, приведенной в [2]. Центральной частью системы является голографический измерительный комплекс с реактором, размещенным на оптической скамье. К числу технических средств, обеспечивающих функционирование системы, относятся блок управления с цифровым преобразователем информации, ЭВМ, исполнительное устройство. Необходимым новым условием работы системы является наличие в ЭВМ базы данных с эталонными голографическими интерферограммами, зарегистрированными в заданном диапазоне экспериментальных условий, а также эмпирических зависимостей влияния расхода водорода на смещение интерференционных полос.

Запуску системы автоматического управления предшествует ввод в ЭВМ следующей исходной информации: название транспортирующего газа; способ подачи газа; температура подложки  $T_s$ ; диаметр подложки. Кроме того, из базы данных ЭВМ запрашиваются: физические параметры, необходимые для интерпретации интерференционных полос; изображение эталонной голографической интерферограммы газового потока в заданной области экспериментальных условий; координата темной интерференционной полосы над подложкой с максимальным порядковым номером на эталонной голографической интерферограмме; эмпирическая зависимость влияния скорости газового потока на картину хода интерференционных полос в окрестностях заданных значений этого параметра.

Затем осуществляется настройка голографического измерительного комплекса для визуализации рабочей зоны RTCVD реактора в реальном времени. Эта стадия включает этап регистрации картины интерференции опорной и эталонной волн и этап обработки фотопластины.

Выход на заданные параметры процесса, считывание и запоминание информации, регулирование расхода газа осуществляются в соответствии с программой функционирования системы автоматического управления.

Анализ хода интерференционных полос при сравнении эталонных и объектных голографических интерферограмм показал, что несоответствие координат характерных точек ( $\Delta y = y_{i \text{ эт}} - y_{i \text{ об}}$ ) растет по мере удаления интерференционных полос от края подложки (рис.2). Поскольку такая закономерность повторялась многократно, в схеме управления рассматривалось только несоответствие координат характерных точек интерференционных полос, имеющих максимальный порядковый номер  $y_{i \text{ max}}$ . Отсчет порядковых номеров интерференционных полос и координат  $y_i$  осуществлялся от края подложки.



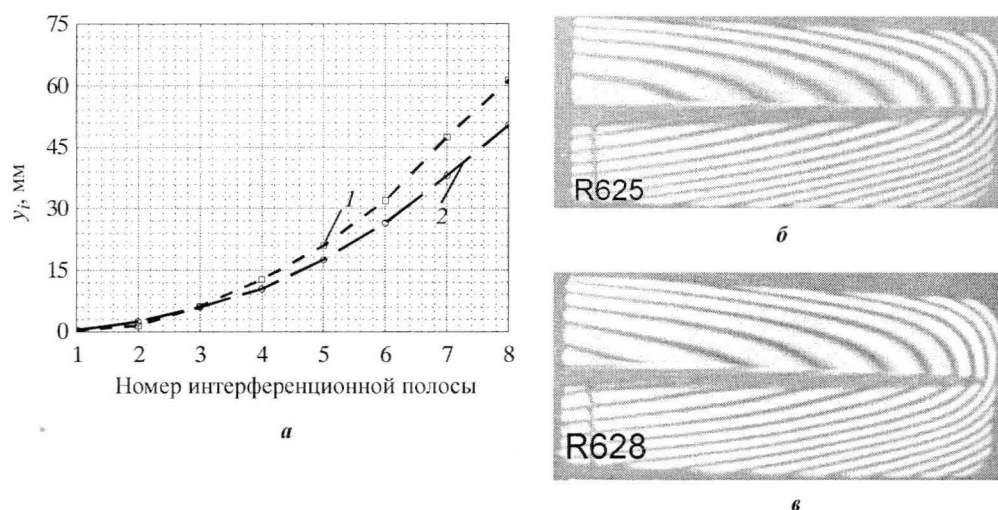


Рис.2. Несоответствие координат характерных точек интерференционных полос (а) на эталонной (б) и объектной (в) голографических интерферограммах: кривые 1, 2 – координаты интерференционных полос на эталонной и объектной голограммах соответственно

Алгоритм реализации процесса управления поясним на следующем примере (рис.3). Допустим, сравниваются эталонная и объектная голографические интерферограммы, показанные на рис.2,б,в. Эти голографические интерферограммы отражают поля градиента показателя преломления водорода в экспонируемом пространстве, поступающего в реакционную камеру одновременно через точечные отверстия в нижнем фланце, расположенные по окружностям диаметром 162 мм ( $Q_{162}$ ) и 102 мм ( $Q_{102}$ ). Температура подложки составляет 1100 К, диаметр подложки равен 150 мм. Число интерференционных полос на сравниваемых голографических интерферограммах равно 8 ( $y_{i \max} = y_8$ ).

Эмпирическая зависимость влияния скорости газового потока на картину хода интерференционных полос на эталонной голографической интерферограмме в рассматриваемой области экспериментальных условий имеет вид:

$$Q = -0,3y^2 + 34,9y - 984,3. \quad (1)$$

После выхода на заданные параметры процесса фотокамера с установленной периодичностью регистрирует изображения объектных голографических интерферограмм газовой фазы. В каждом отдельном случае осуществляется цифровая обработка изображений объектных голографических интерферограмм, затем координата  $y_8$  на объектной голографической интерферограмме  $y_{8 \text{ об}}$  сравнивается с аналогичной координатой на эталонной интерферограмме  $y_{8 \text{ эт}}$ . По полученной разности  $\Delta y$  с помощью функции (1) определяется требуемый расход водорода в реакторе в данный момент.

Требуемый расход водорода сравнивается с установленным ранее значением, которое изменяется на величину  $Q'_{162} = Q_{162} + \text{sign}(\Delta y) \cdot \Delta Q$ . Информация об изменении расхода водорода передается на исполнительное устройство.

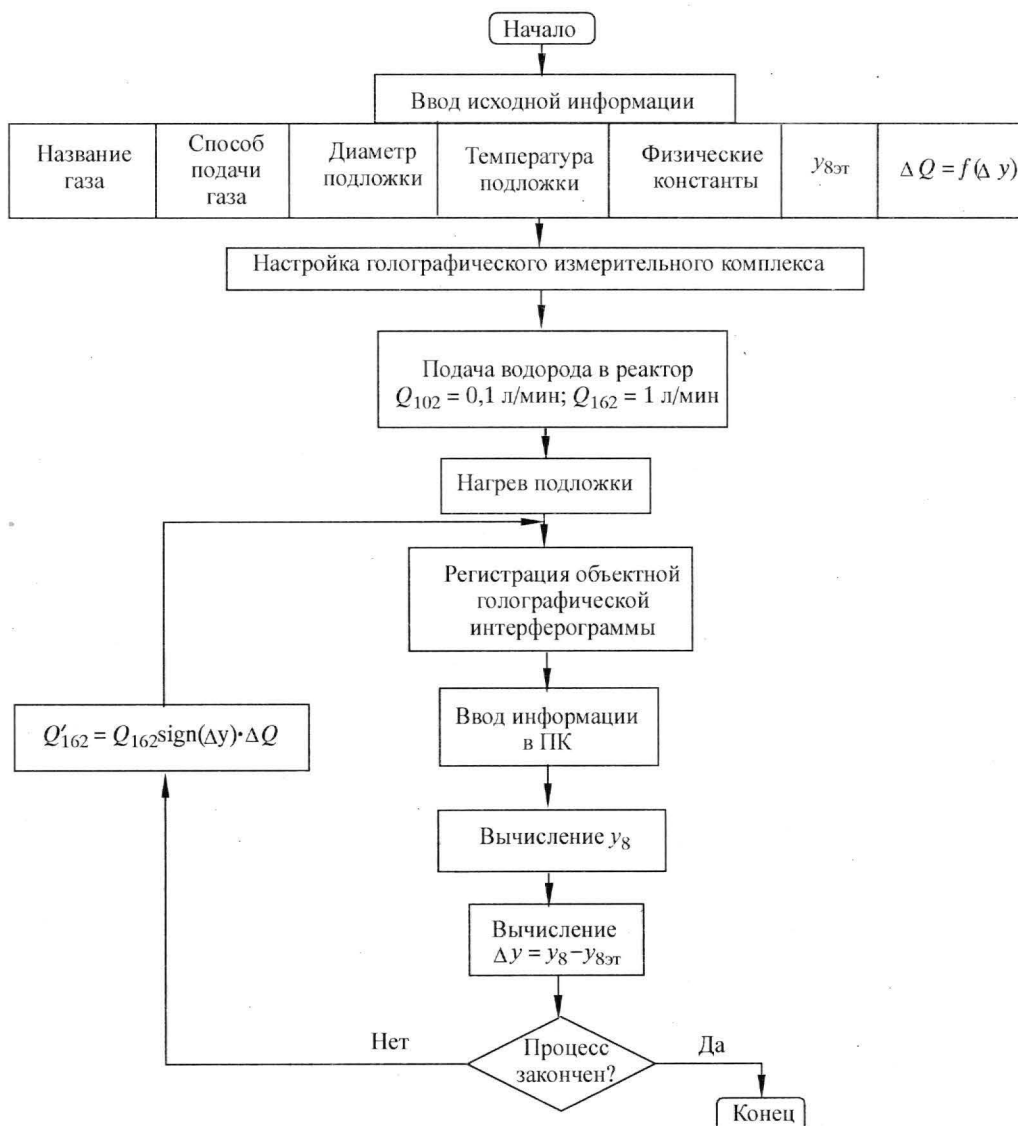


Рис.3. Блок-схема алгоритма управления

Процесс приведения газодинамической ситуации к требуемой повторяется многократно, пока не будет достигнуто соответствие координат интерференционных полос на объектной и эталонной голографических интерферограммах.

Программная реализация разработанного алгоритма осуществлена в среде MatLab 6.5 с использованием пакета Image Processing Toolbox.

### Литература

1. Roozeboom F. History and perspectives of rapid thermal processing // Advances in rapid thermal and integrated processing / Ed. Roozeboom F. – NATO ASI Series. – 1996. – Vol. 318. – P. 1–34.
2. Rainova Yu.P., Antonenko K.I., Barchotkin A.V., Pezoldt J. Optimization and control of gas flows in RTCVD reactor // Electrochemical Soc. Symp. Proc. – 2000. – Vol. 2000. – P. 393–400.
3. Райнова Ю.П. Быстрые термические процессы: специфика, перспективы, проблемы // Изв. вузов. Электроника. – 2000. – № 2. – С. 25–31.

4. *Бархоткин А.В., Мальцева С.В., Райнов А.Ю.* Информационно-измерительная система для автоматического управления газодинамическими течениями в быстрых термических процессах. – Сб. материалов XV науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» / Под ред. В.Н.Азарова. – М.: МГИЭМ, 2003. – С. 176, 177.
5. Голографическая интерферометрия фазовых объектов / *А.К.Бекетова, А.Ф.Белозеров, А.Н.Березкин и др.* – Л.: Наука, 1979. – 232 с.
6. *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. – М.: Мир. – 1982. – 504 с.
7. *Rainova Yu.P., Antonenko K.I., Pezoldt J., Schenk A., Eichhorn G.* Holographic interferometry of temperature distribution in a RTP reactor. – Chemical vapor deposition / Ed. Allendorf M.D., Bernard C. // Proc. of the Fourteenth International Conference and EUROCVD-11. – 1997. – Vol. 97–25. – P. 717–724.
8. *Ярославский Л.П.* Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии. Введение в цифровую оптику. – М.: Радио и связь, 1987. – 296 с.

Статья поступила  
8 февраля 2005 г.

*Бархоткин Вячеслав Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники МИЭТ, проректор по научной работе МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка специализированных вычислительных средств и систем управления.

*Райнова Юлия Петровна* – кандидат технических наук, профессор кафедры материалов и процессов твердотельной электроники МИЭТ. *Область научных интересов:* газофазные процессы микроэлектроники, быстрые термические процессы, визуализация прозрачных сред.

*Терентьев Алексей Игоревич* – стажер-исследователь кафедры вычислительной техники МИЭТ. *Область научных интересов:* системы автоматического управления, цифровая обработка сигналов, микроконтроллеры.

*Райнов Александр Юрьевич* – инженер кафедры материалов и процессов твердотельной электроники МИЭТ. *Область научных интересов:* автоматизация контроля и управления быстрыми термическими процессами, цифровая обработка голографических интерферограмм.

## Информация для читателей журнала

### «Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на 2006 г. в редакции с любого номера. Стоимость одного номера – 450 руб. (с учетом всех налогов и почтовых расходов).

Адрес редакции:

124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ, комн. 7232

Тел.: (095) 534-62-05. Факс: (095) 530-54-29

E-mail: [magazine@rnd.miee.ru](mailto:magazine@rnd.miee.ru)

<http://www.miet.ru/static/je/os.html>



## **Структура и основные элементы системы виртуального производства**

*Т.Ю.Крупкина*

**Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)**

Рассмотрены подходы к построению концепции виртуального производства. Приведена структура и выделены основные элементы системы моделирования процесса производства интегральных схем на физическом уровне.

Термины «виртуальная фабрика», «виртуальное производство» широко распространены в работах, посвященных современным принципам организации проектирования и промышленного производства интегральных схем [1–4]. Отличительная черта этого процесса – существование большого количества фирм-дизайнеров, не имеющих своего производственного цикла (fabless). Число таких фирм в настоящее время быстро растет. Их взаимодействие с фабриками-изготовителями осуществляется через хорошо проработанные процедуры так называемого «бесшовного» интерфейса [5]. И дизайнеры, и изготовители активно используют программные средства моделирования, образующие виртуальное пространство, среду, в которой ведется проектирование и оптимизация конструкций интегральных элементов и микросхем в целом.

Под виртуальной фабрикой (virtual fab) понимают место в Интернете, где можно разместить заказ на изготовление кристаллов [1, 3]. В отличие от виртуальной фабрики, виртуальное производство (virtual manufacturing) можно рассматривать как систему полного сквозного приборно-технологического моделирования на физическом уровне [6], как оболочку синтеза технологий [4], как систему моделирования на уровне фабрики [7]. Термин «виртуальное производство» наиболее полно и точно соответствует системе моделирования процесса производства интегральных схем на физическом уровне. Виртуальное производство изделий по интегральной технологии осуществляется в определенной программной среде, и можно увидеть, как из исходных пластин на входе получаются на выходе интегральные элементы с определенными электрическими и схемотехническими параметрами. Таким образом, «виртуальное производство» – это общее понятие для интегрированной системы программных и аппаратных средств и методов моделирования, которая позволяет разработчикам синтезировать полный маршрут технологического процесса и изготавливать ИС, оптимизированные по критериям характеристик надежности, технологичности, стоимости и времени производственного цикла [6].

При постоянном росте стоимости современного производства экономия от имитационного моделирования как при разработке новых изделий, так и при модернизации и оптимизации уже имеющихся необычайно велика. Моделирование и имитация в рамках виртуального производства являются наилучшими и незаменимыми инструментами при разработке новых технологических маршрутов, конструктивно-технологических узлов, оптимизации интегральных структур. Возможности такой системы и принцип ее организации отражены в структуре, представленной на рисунке.



Структура системы виртуального производства

Основу и «движущую силу» системы виртуального производства составляют программные средства приборно-технологического моделирования (TCAD). Для вариантов технологии, обеспечивающих создание современных СБИС, данный комплекс должен обладать следующими характеристиками:

- высокоточное двух- и трехмерное моделирование всех операций, входящих в базовый технологический процесс;
- возможность использования всех традиционных материалов и примесей, а также новых материалов, примесей и реакций с параметрами, задаваемыми пользователем;
- интеграция вычислительных процессов для отдельных операций в единую модель технологического маршрута в целом;
- двух- и трехмерное моделирование приборных характеристик структур, получаемых в результате имитации технологического процесса,
- экстракция параметров физических и схемотехнических моделей элементов СБИС;
- возможность многофакторной оптимизации процессов и выхода годных.

Как видно из рисунка, система виртуального производства запускается вводом маршрутной карты реального производства. На выходе мы должны иметь схемотехнические параметры оптимизированных интегральных элементов, характеристики конструктивно-технологических узлов. Цикл оптимизации, по которому движется виртуальная партия, включает несколько этапов.

Этап технологического моделирования, для выполнения которого необходимо иметь предварительно откалиброванные модели процессов, привязанные к конкретным единицам реального производственного оборудования. Полный набор таких моделей представляет собой парк виртуального оборудования. После того как технологический маршрут для заданной виртуальной партии выполнен, можно приступить к «измерению» электрических и других характеристик.

Стандартные форматы представления результатов моделирования и специальные программы-редакторы позволяют сформировать виртуальные тестовые структуры и образцы интегральных элементов и исследовать их отклик на внешние воздействия различного рода (электрические, электромагнитные, оптические, тепловые, механические и др.). Используемые для таких расчетов программы численного двух- и трехмерного моделирования обеспечивают работу такого виртуального комплекса в исследовательских целях, а также формируют набор данных для перехода к задачам схемотехнического проектирования.

Встроенный в цикл работы виртуального производства этап экстракции схемотехнических параметров элементов готовит информацию для принятия решения о годности данных элементов по критериям, задаваемым дизайнерами схем, или о продолжении оптимизации технологического маршрута и конструкции элемента. Взаимосвязь всех этапов создает условия для обоснованного выбора параметров критичных технологических операций, обеспечивающих наиболее устойчивые к технологическому разбросу значения схемотехнических характеристик.

Система виртуального производства, построенная по такому принципу и располагающая откалиброванным рядом моделей виртуального технологического оборудования, позволяет успешно снижать стоимость разработок, а также решать целый комплекс проблем взаимодействия изготовителя и дизайнера-разработчика СБИС (таблица).

**Взаимодействие разработчика СБИС и изготовителя в рамках системы виртуального производства**

Задача	Исходная информация		Выходная информация	
	Кто представляет	Вид информации	Кто получает	Вид информации
Проектирование базового процесса	Изготовитель	Эскизные варианты маршрутов	Изготовитель	Номенклатура, последовательность и характеристики структурообразующих операций
Проектирование стандартных процессов	Изготовитель	Маршрут стандартного процесса	Изготовитель	Значения контролируемых характеристик процесса
Разработка проектных норм для конкретного стандартного процесса	Изготовитель	Документация на стандартный процесс	Разработчик СБИС	Проектные нормы, схемотехнические параметры приборов
Анализ устойчивости контролируемых характеристик процесса	Изготовитель	Диапазон изменения операционных параметров	Изготовитель	Диапазон разброса контролируемых характеристик процесса
Разработка процесса под специальный заказ	Разработчик СБИС	Схемотехнические характеристики	Изготовитель	Технологический маршрут и параметры операций
Оптимизация процесса с точки зрения выхода годных	Изготовитель, разработчик СБИС	Маршрут, параметры операций, требуемые схемотехнические характеристики	Изготовитель	Оптимальные значения (диапазоны) параметров операций

Задача	Исходная информация		Выходная информация	
	Кто представляет	Вид информации	Кто получает	Вид информации
Проверка проектных норм и библиотечных элементов	Разработчик СБИС	Проектные нормы, топология библиотечных элементов, требуемые схемотехнические характеристики	Разработчик СБИС	Расчетные схемотехнические характеристики
Моделирование фрагментов топологии и тестовых структур	Разработчик СБИС	Топология, проектные нормы	Разработчик СБИС	Электрофизические параметры слоев, электрические и схемотехнические характеристики

Таким образом, построенная на основе откалиброванных моделей и программных средств приборно-технологического моделирования система виртуального производства способна играть важную роль в организации так называемых виртуальных фабрик, выполняя ряд интерфейсных функций. Имитационное моделирование и оптимизация, выполняемые при разработке технологических маршрутов и конструктивно-технологических узлов с помощью средств «виртуального производства», существенно сокращают для изготовителя стоимость разработки и сроки запуска изделий.

### Литература

1. *Su Y.H., Guo R.S., Chang S.C.* Virtual fab: an enabling framework and dynamic manufacturing service provision mechanism // Information & Management. – 2005. – Vol. 42, № 2. – P. 329–348.
2. *Upton D.M., McAfee A.* The real virtual factory // Harvard Business Review. – 1996. – July–August. – P. 123–133.
3. A dynamic binding model for service creation in virtual fab / *S.C.Chang, T.L.Chou, R.S.Guo et al.* // Proc. of the 1998 Semiconductor Manufacturing Technology Workshop (Hsinchu Taiwan, 16–17 June, 1998). – 1998. – P. 131–138.
4. *Lemnios Z.J.* Beyond MMST: The virtual factory // Solid-State Technology. – February. – 1994. – P. 25, 26.
5. *Banerjee S., Golhar D.Y.* Electronic data interchange: characteristics of users and nonusers // Information & Management. – 1994. – Vol.26. – P. 65–74.
6. Повышение технологичности СБИС на основе концепции виртуального производства / *В.В.Баринков, О.Ф.Бахмач, А.В.Калинин и др.* // Микроэлектроника. – 1999. – № 4. – С. 283–292.
7. *Brown S., Chance F., Fowler J.W., Robinson J.* A Centralized approach to factory simulation // Future Fab International. – 1997. – Vol. 1, № 3. – P. 83–86.

Статья поступила  
19 января 2005 г.

**Крупкина Татьяна Юрьевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* моделирование технологических процессов и интегральных приборов, развитие методов проектирования интегральной элементной базы и элементов микросистемной техники.



# МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.38.049.77

## Магнитоуправляемый динистор

*Ю.А. Чаплыгин, А.И. Галушков*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

*А.А. Семёнов, Д.А. Усанов*

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Представлены результаты исследования воздействия постоянного магнитного поля на режимы работы симметричного транзисторного эквивалента динистора с магниточувствительным элементом в цепи обратной связи. Показана возможность реализации динистора с отрицательным дифференциальным сопротивлением, регулируемым индукцией приложенного магнитного поля.

Магнитодиоды и магнитотранзисторные структуры помимо разнообразного использования в качестве датчиков магнитного поля могут применяться для создания генераторов автоколебаний и усилителей. Такие устройства реализуются при использовании магнитодиодов и магнитотранзисторных схем с ВАХ  $N$ - и  $S$ -типа.

Введение в полупроводниковые структуры обратных связей по току или напряжению позволяет схемотехнически синтезировать устройства с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС), имеющие  $N$ - и  $S$ -образные ВАХ. Приборы такого типа являются, по-существу, элементарными функциональными устройствами в силу наличия у них собственной внутренней реактивности. Обладая точно прогнозируемыми характеристиками, параметры которых жестко определяются схемотехническими решениями, устройства с ОДС все чаще используются как управляемые аналоги индуктивностей и емкостей полупроводниковых генераторов, приемников и СВЧ-фильтров в интегральном исполнении. Введение в такие приборы магниточувствительных структур позволяет создать новый класс устройств с характеристиками, управляемыми магнитным полем. Специфической особенностью схем такого рода является то, что режимами их работы можно управлять воздействием как электрического, так и магнитного поля. На этой основе можно создавать устройства новых типов, которые будут представлять широкий практический интерес.

В [1] показана возможность создания транзисторного эквивалента тиристора, характеристики которого в низкоомном состоянии регулируются магнитным полем. Такая возможность осуществлена в результате применения в качестве одного из транзисторов эквивалентной схемы замещения тиристора двухколлекторного биполярного магнитотранзистора. Изменение напряжения переключения в предложенной схеме осуществлялось

регулировкой сопротивления, включенного в цепи баз транзисторов. Магнитным полем регулировался только ток в низкоомном состоянии.

Для создания аналога динистора с участками ОДС, количество и крутизна которых определяются индукцией воздействующего магнитного поля, использовалось устройство, принципиальная схема которого показана на рис.1. Приборы такого рода позволяют с помощью одного схемотехнического решения реализовывать устройства различного функционального назначения.

Для управления базовыми токами транзисторов, реализующих эквивалент  $p-n-p-n$ -структуры, в предложенной схеме используется линейный интегральный преобразователь магнитное поле–напряжение (ПМН) [2, 3] и токоограничивающий резистор  $R_{Б1}$ , которые определяют ток базы транзистора  $VT3$  и, соответственно, точку вхождения его в режим насыщения.

Принцип работы устройства аналогичен представленному в [1] с тем отличием, что в схему введены дополнительные резисторы  $R_{КБ1}$  и  $R_{КБ2}$ , определяющие базовые токи соответственно транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ . Транзистор  $VT3$  в режиме насыщения шунтирует токозадающее сопротивление  $R_{КБ1}$  резистором  $R_{ш}$  и проводимостью насыщенного перехода коллектор–эмиттер, тем самым изменяя ток базы транзистора  $VT1$ . В результате изменяется глубина положительной обратной связи по току, а следовательно, и выходное дифференциальное сопротивление.

Типичная вольт-тесловая характеристика ПМН (типа П5-26) приведена на рис.2 (корректирующие токозадающие входы  $V_{х.1}$  и  $V_{х.2}$  соединены с общим проводом). Линейность этой зависимости составляет 0,2–0,9% в диапазоне значений индукции магнитного поля от –200 до 200 мТл, что позволяет при моделировании устройства заменить ПМН источником эдс, пропорциональной действующему магнитному полю.

Моделирование работы магнитоуправляемого аналога динистора проводилось в программном пакете Electronics Workbench 5.12 Professional Edition. Программа аппроксимирует исследуемое устройство системой нелинейных дифференциальных уравнений, составленной методом узловых потенциалов, и вычисляет напряжения в узлах и токи в ветвях численным методом Гира шестого порядка.

Полученные в результате численного анализа ВАХ транзисторного эквивалента  $p-n-p-n$ -структуры при различных значениях эдс из диапазона 0,5–8 В, соответствующих значениям магнитного поля в интервале от –240 до 150 мТл, представлены соответственно на рис.3 (кривые 1). Как следует из результатов расчета, с изменением магнитного поля на ветви ВАХ с отрицательным наклоном возникает дополнительный участок ОДС с большей крутизной и участок с нулевым дифференциальным сопротивлением.

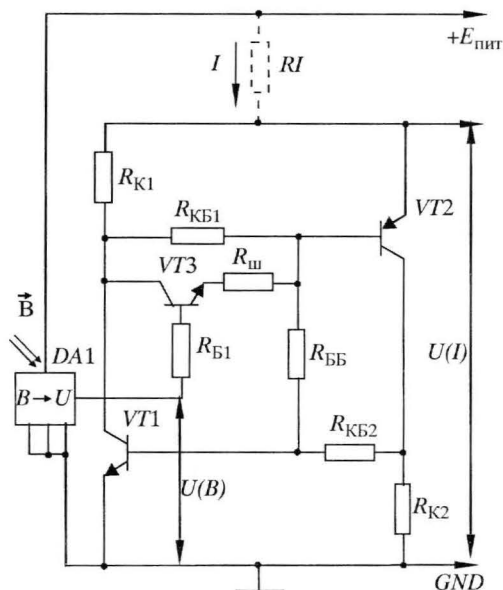


Рис.1. Принципиальная электрическая схема исследуемого устройства

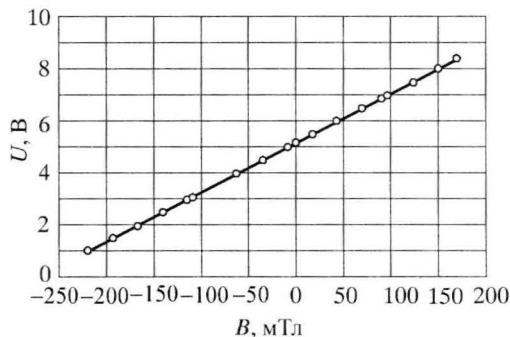


Рис.2. Вольт-тесловая характеристика линейного интегрального преобразователя магнитное поле – напряжение (типа П5-26)

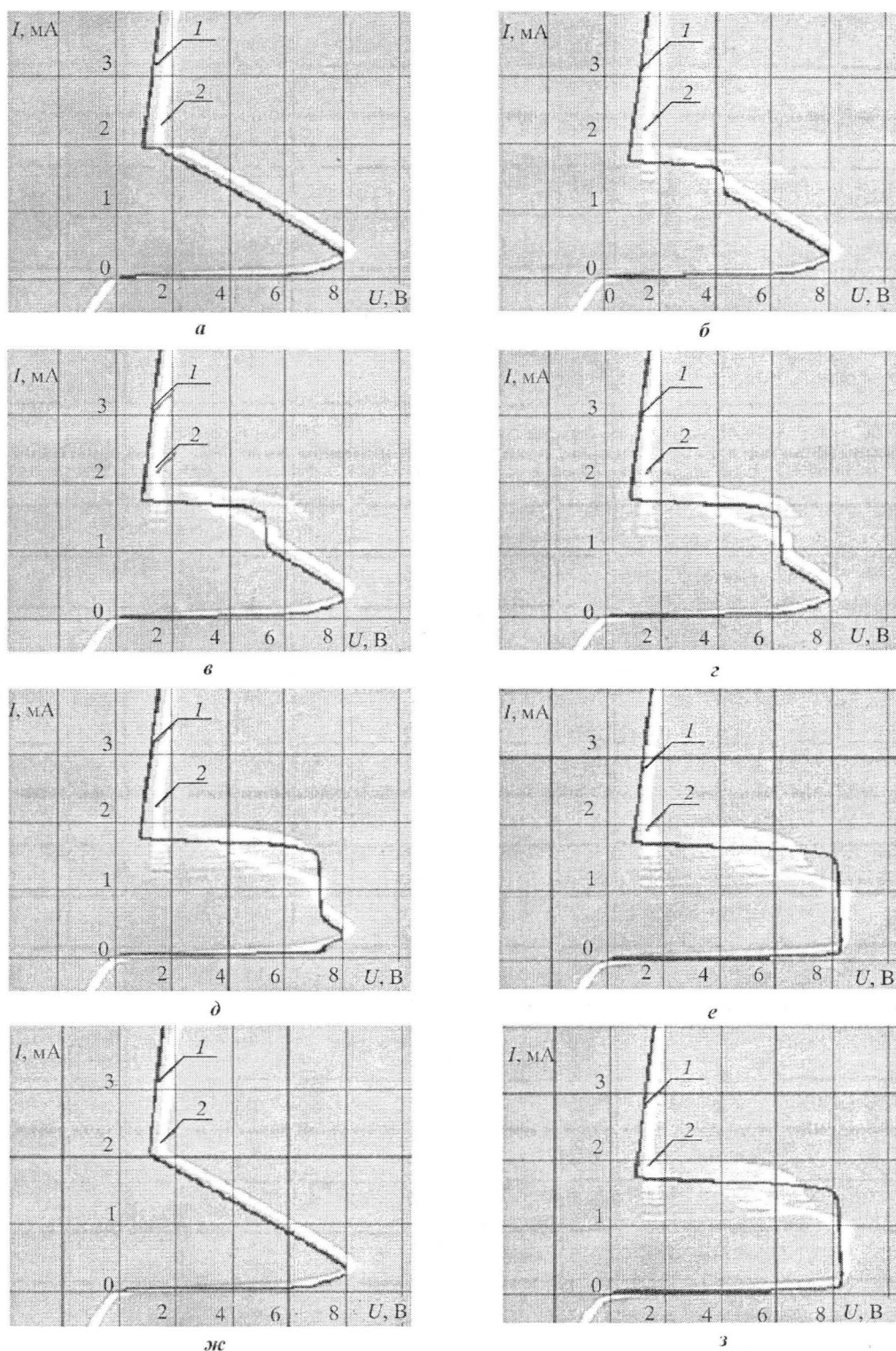


Рис.3. ВАХ магнитоуправляемого аналога динистора при различных значениях внешнего магнитного поля и соответствующих им эдс (1 – расчет; 2 – эксперимент): а –  $B = -240$  мТл,  $U(B) = 0,5$  В; б –  $B = -220$  мТл,  $U(B) = 1$  В; в –  $B = -60$  мТл,  $U(B) = 4$  В; г –  $B = -10$  мТл,  $U(B) = 5$  В; д –  $B = 45$  мТл,  $U(B) = 6$  В; е –  $B = 100$  мТл,  $U(B) = 7$  В; ж –  $B = 120$  мТл,  $U(B) = 7,5$  В; з –  $B = 150$  мТл,  $U(B) = 8$  В

Протяженность и взаимное расположение на ВАХ этих участков однозначно определяются магнитным полем. При значении эдс равном 8 В, что соответствует магнитному полю индукции, равной 150 мТл, участок ОДС меньшей крутизны на ВАХ – эквивалента  $p-n-p-n$ -структуры практически исчезает.

Для сопоставления полученных результатов эксперименту создано устройство, реализующее схему, показанную на рис.1. Внешний вид исследуемого устройства приведен на рис.4.

Значения сопротивлений элементов уточнялись в процессе моделирования и в экспериментальном образце были следующие:  $R_{K1} = 240 \text{ Ом}$ ;  $R_{K2} = 1 \text{ кОм}$ ;  $R_{KB1} = 18 \text{ кОм}$ ;  $R_{KB2} = 1 \text{ кОм}$ ;  $R_{B1} = 68 \text{ кОм}$ ;  $R_{ш} = 300 \text{ Ом}$ ;  $R_{BB} = 180 \text{ кОм}$  (подстроечный – от 0 до 220 кОм) (1). В качестве транзисторов VT1, VT3 использовались приборы типа КТ3102Б, транзистора VT2 – КТ3107Г. Линейный ПМН бескорпусного типа закреплялся на держателе, в качестве которого применялся металло-пластмассовый корпус мощного транзистора типа КТ819Б. Устройство помещалось в калиброванный зазор лабораторного электромагнита, величина которого составляла 10 мм. Фиксированные значения действующего в зазоре магнитного поля обеспечивались питанием электромагнита от стабилизированного источника постоянного тока.

Поскольку  $S$ -образная характеристика динистора является неоднозначной зависимостью тока от напряжения, измерение ВАХ проводилось с помощью генератора тока, управляемого напряжением. При этом сигнал с задающего генератора линейно изменяющегося напряжения подавался на преобразователь напряжение–ток и на усилитель вертикального отклонения осциллографа С1-96, а сигнал напряжения на исследуемом двухполюснике  $U(I)$  – на усилитель горизонтального отклонения. Такое включение позволяло наблюдать характеристику исследуемого прибора непосредственно на экране осциллографа.

Наблюдаемые характеристики фиксировались с помощью видеокамеры, имеющей интерфейс связи с компьютером. Представленные на рис.3 (кривые 2) осциллограммы ВАХ исследуемого устройства при значениях магнитного поля, задаваемых в диапазоне, соответствующем численному эксперименту, хорошо коррелируют с расчетными данными (см. рис.3, кривые 1). Генерация, наблюдаемая на появляющейся под воздействием магнитного поля ветви ВАХ, обусловлена паразитным колебательным контуром, образованным индуктивностью двухполюсника, емкостью соединительного кабеля и входной емкостью осциллографа.

Отметим, что подобный режим наблюдался и при численном моделировании (рис.5,а). Подавить его в рамках численного эксперимента

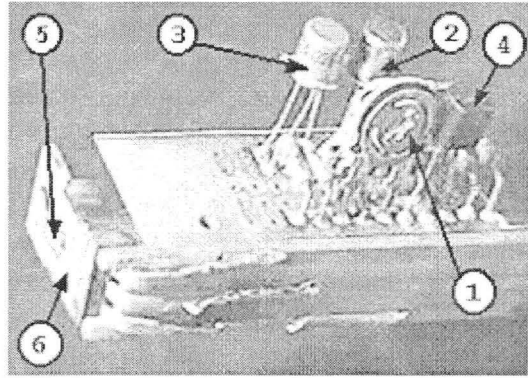


Рис.4. Внешний вид исследуемого устройства: 1 – резистор  $R_{BB}$ ; 2, 3, 4 – транзисторы VT1, VT3; VT2 соответственно; 5 – бескорпусной ПМН; 6 – держатель ПМН

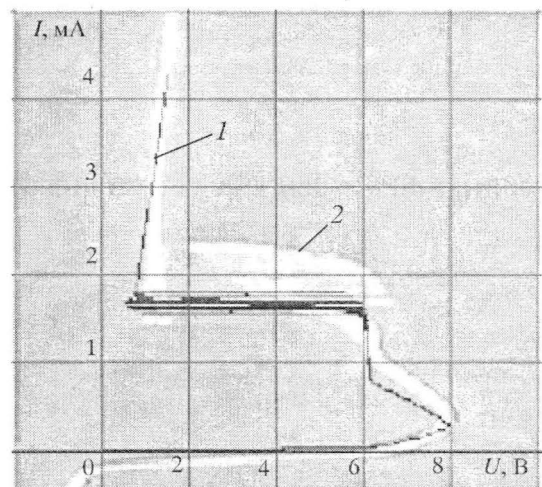


Рис.5. ВАХ магнитоуправляемого аналога динистора с областью генерации: 1 –  $B = 45 \text{ мТл}$ ;  $U(B) = 6 \text{ В}$  (расчет); 2 –  $B = 45 \text{ мТл}$  (эксперимент)



удалось уменьшением в расчете частоты задающего генератора развертки до значения 1 Гц, а также введением в цепи эмиттеров транзисторов  $VT1$ ,  $VT2$  дополнительных резисторов  $R_{Э1}$ ,  $R_{Э2} = 5$  Ом (см. рис.3,б–ж, кривые 1). В эксперименте такое решение не позволяет наблюдать ВАХ на экране осциллографа вследствие малого времени послесвечения люминофора осциллографической трубки.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность создания аналога динистора с несколькими участками ОДС, количество и крутизна которых определяются величиной индукции магнитного поля, воздействующего на прибор. Магнитоуправляемые аналоги динисторов технологически совместимы с основными технологиями производства интегральных микросхем, поэтому могут быть реализованы в интегральном исполнении, как и выпускаемые промышленностью комплиментарные пары аналогов динисторов серий КР1182КП1, КР1125КП3.

### Литература

1. Чаплыгин Ю.А., Галушков А.И., Семёнов А.А., Вениг С.Б., Усанов Д.А. Магнитотристор с регулируемыми характеристиками в низкоомном состоянии // Изв. вузов. Электроника. – 2004. – № 3. – С. 42–45.
2. Амеличев В.В., Галушков А.И., Зубенко Ф.Г., Чаплыгин Ю.А. Интегральные датчики магнитного поля // Электронная промышленность. – 1992. – № 3. – С. 58, 59.
3. Галушков А.И., Чаплыгин Ю.А. Кремниевые магниточувствительные интегральные схемы // Изв. вузов. Электроника. – 1997. – № 1. – С. 53–56.

Статья поступила  
4 февраля 2005 г.

**Чаплыгин Юрий Александрович** – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, ректор МИЭТ. *Область научных интересов:* твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, физика и технология сенсоров и микросистем.

**Галушков Александр Иванович** – кандидат технических наук, начальник научно-технического отдела НПК «Технологический Центр» МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование и разработка технологии изготовления магниточувствительных сенсоров и микросистем, элементной базы аналого-цифровых КМОП ИС.

**Семёнов Андрей Андреевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела Саратовского государственного университета им. Н.Г.Чернышевского. *Область научных интересов:* твердотельная электроника, микросхемотехника, применение нелинейной динамики в полупроводниковой электронике, радиофизика.

**Усанов Дмитрий Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела, проректор по научной работе Саратовского государственного университета им. Н.Г.Чернышевского. *Область научных интересов:* твердотельная электроника СВЧ, радиоволновые и оптические методы контроля, применение нелинейной динамики в полупроводниковой электронике.

# СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 621.3.049.771.14

## Анализ помех, влияющих на задержку прохождения сигнала в цифровых СБИС, на основе логических ограничений

*Р.А.Соловьев, А.Л.Глебов, С.В.Гаврилов*

**Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (г. Москва)**

Предложен метод решения задачи анализа помехи, влияющей на общую задержку прохождения сигнала в СБИС, учитывающий данные о задержке в каждом из функциональных узлов схемы одновременно. Метод основан на алгоритме известного метода ветвей и границ с несколькими эвристическими дополнениями. Приведенные экспериментальные результаты демонстрируют высокую эффективность предлагаемого метода.

Разработчики высокоскоростных цифровых СБИС столкнулись с проблемой воздействия помех, вызванных перекрестными соединениями на фоне уменьшения размеров активных элементов изделий и повышения степени их интеграции. В современной практике разработки СБИС указанные факторы учитываются с использованием новейших методов статического временного анализа (СВА), которые позволяют рассчитывать помеху задержки отдельно для каждого узла СБИС. Совокупность задержек образует общую задержку прохождения сигнала в СБИС, поэтому изменение любой из них может существенно влиять на оценку общей задержки.

Повышение степени интеграции СБИС способствует росту емкостных связей межсоединений, что приводит к возрастанию количества индуцированных помех. Изменение времени задержки прохождения сигналов в цепях СБИС, вызванное переключающимися соседними функциональными узлами, называемое помехой задержки [1], стало значительно влиять на суммарную, или общую, задержку прохождения сигналов в СБИС. Этот факт приводит к необходимости анализа и разработки методов учета помех в современных цифровых СБИС.

При анализе помех функциональный узел СБИС, в котором оценивается помеха, называют узлом-жертвой, а соседние узлы – узлами-агрессорами. Жертва и группа агрессоров вместе образуют кластер.

Переключение узла-агрессора может ускорить или замедлить переключение узла-жертвы в зависимости от типа переключения каждого из них. Наведенные помехи зависят от числа переключающихся узлов-агрессоров, а также от соотношения направления переключений между собой и направлением переключения узла-жертвы. Из-за большого возможного числа вариантов переключения узлов-агрессоров и ряда внешних факторов точно предсказать значение помехи невозможно.

В наиболее простом методе анализа помех исходят из предположения, что все узлы-агрессоры могут переключаться одновременно и в одном направлении [2, 3]. Однако полученная таким образом оценка является слишком жесткой и достаточно грубой, поскольку некоторые узлы-агрессоры не могут переключиться одновременно из-за временных и логических корреляций.

Для уточнения полученной оценки влияния помех на задержку прохождения сигнала СБИС применяется ряд фильтров (алгоритмов), основанных на учете логики схемы.

В методе, описанном в [4], поиск наихудшего двухвекторного теста проводится с использованием характеристической функции схемы. Известны также методы, основанные на генерации тестовых последовательностей [3]. Однако эти методы сложны и требуют большого времени счета применительно к СБИС. В [5, 6] предложен метод, основанный на простых логических импликациях (ПЛИ) [7], которые описывают логическую связь между парами сигналов. Сначала ПЛИ формируются для логических вентилей, а остальные импликации получают путем прямого и обратного распространения имеющихся ПЛИ. В [8, 9] предложен более быстрый и удобный метод анализа помех в СБИС, использующий алгоритм метода резолюций [10]. Рассмотренные методы с использованием логических ограничений предназначались главным образом для анализа функциональных помех. Однако проблема завышенной оценки более характерна для помех, влияющих на задержку распространения сигналов в цепях схем.

Идея распространения метода, использующего логические ограничения на анализ помех в СБИС, может казаться простой, так как процесс получения ограничений остался тем же. Сложность заключается в том, что логические ограничения необходимо рассматривать для намного большего числа сигналов из-за того, что один и тот же узел-агрессор может воздействовать на несколько узлов-жертв. Однако основываясь на наблюдении отношения между величиной помехи и вызванном ею изменении задержки, может быть построена линейная модель, способствующая эффективной оптимизации решения задачи.

Максимальный реализуемый набор агрессоров (МРНА) – это совокупность узлов-агрессоров СБИС, которые могут переключиться одновременно и при этом не противоречат найденным логическим корреляциям между этими узлами-агрессорами. В [5, 6] показано, что вычисление МРНА относится к *NP*-полным задачам. Несмотря на экспоненциальную сложность, для анализа функциональных помех возможно использование способа полного перебора, так как кластеры анализируются отдельно и составляют до десяти узлов-агрессоров [8, 9]. Но такое решение не подходит для анализа помехи, влияющей на суммарные задержки в СБИС, когда необходимо одновременно учитывать все возможные (в том числе и взаимные) переключения узлов жертв и агрессоров. Тогда для пути, например, из 10 узлов количество учитываемых при расчетах узлов-агрессоров может возрасти до 100 и для решения задачи потребуются более сложные и эффективные методы, чем простой перебор. Один из таких методов и предложен в настоящей работе.

На рис.1 представлен кластер и форма сигнала с дополнительной задержкой, индуцированной помехой. Как уже отмечалось, помеху на узел-жертву наводят сразу несколько узлов-агрессоров. В анализе помех принято использовать линейную модель для агрессоров и жертв, вычисляя индуцированную помеху на основе принципа суперпозиции.

Для получения консервативной оценки все импульсы складываются в пиках, как показано на рис.2. В общем случае изменение задержки распространения сигнала в узлах СБИС из-за помех можно представить нелинейной функцией параметров импульса (длительно-

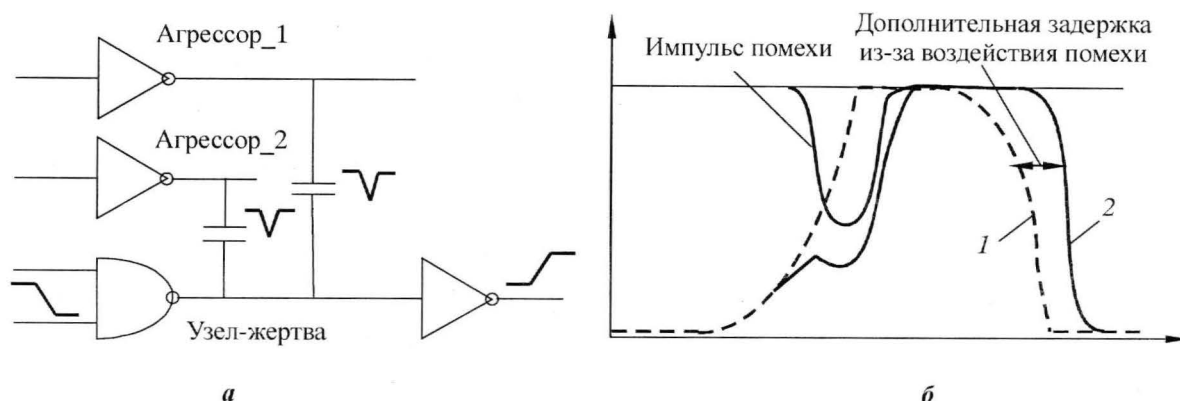


Рис.1. Воздействие помехи на задержку: а – кластер помехи; б – переключение на драйвере и ресивере узла-жертвы (1 – переключение жертвы без помехи; 2 – под воздействием помехи)

сти, амплитуды и др.). Для малых значений помехи эта функция может быть аппроксимирована линейным выражением:

$$\Delta D = \frac{\partial D}{\partial h_n} \Delta h_n + \frac{\partial D}{\partial w_n} \Delta w_n + \dots$$

На начальном этапе СВА учитываются только малые значения помех, поскольку все «большие» импульсы устранены на этапе анализа функциональных помех. Общее изменение задержки  $\Delta D$  может быть представлено как сумма изменений задержки  $\Delta D_i$ , внесенная каждым из узлов-агрессоров:

$$\Delta D = \sum \Delta D_i. \quad (1)$$

Типовой алгоритм СВА содержит следующие этапы:

- расчет задержек распространения сигналов в функциональных узлах с учетом перекрестных помех;
- идентификация функциональных узлов схемы по рассчитанным задержкам распространения сигналов;
- выполнение временного анализа;
- оценка общей задержки распространения сигналов схемы.

Как отмечалось, общая задержка распространения сигнала в СБИС равна сумме задержек и их изменений в каждом из функциональных узлов, через которые проходит сигнал, за счет помех в пути схемы (рис.3). Из формулы (1) можно получить значение изменения задержки сигнала за счет помех:

$$\Delta D_{path} = \sum_{i \in P} \sum_{j \in A_i} \Delta D_{i,j},$$

где  $\Delta D_{i,j}$  – изменение задержки  $i$ -го узла-жертвы в пути  $P$  вследствие помехи, индуцированной  $j$ -м узлом-агрессором.

Возможность более точного учета влияния помех на общее время задержки распространения сигнала в цифровых СБИС, в том числе и с целью исключения его переоценки,

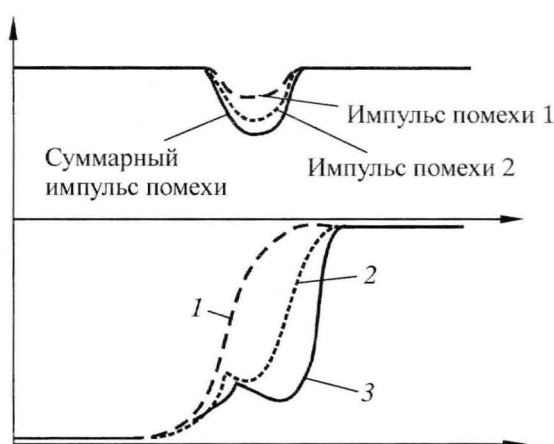


Рис.2. Форма совместного воздействия агрессоров на узел-жертву: 1 – переключение жертвы без помехи; 2 – под воздействием одного агрессора; 3 – под воздействием двух агрессоров)



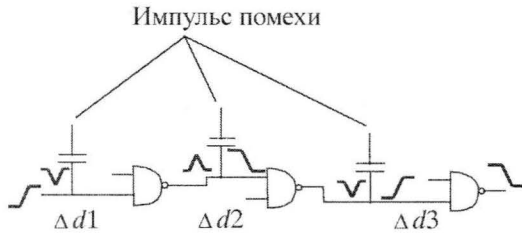


Рис.3. Помеха задержки на проводящем пути ( $\Delta D_{path} = \Delta d1 + \Delta d2 + \Delta d3$ )

Таким образом, два пути, состоящие из одних и тех же узлов, но имеющие различные направления переключений, будут считаться разными. В этом случае МРНА представим как набор узлов-агрессоров, которые могут переключиться одновременно, не нарушая логических состояний схемы, индуцирующих помеху в каждом узле-жертве и приводящих к максимальной задержке распространения сигнала.

**Логические ограничения и анализ помехоустойчивости.** Полный набор логических ограничений схемы может быть задан совокупностью всех возможных комбинаций запрещенных сигналов в форме булева уравнения:  $F(s1, s2, \dots) = 0$  [5, 6]. Комбинации сигналов, удовлетворяющие этому уравнению, называют запрещенными комбинациями, или логическими ограничениями схемы. Функцию  $F$  можно представить суммой произведений (СП):

$$\sum_i \prod_j s_{i,j}^{\alpha_{i,j}} = 0,$$

где  $s^\alpha = s$ , если  $\alpha = 0$  или отрицанию  $\bar{s}$ , если  $\alpha = 1$ .

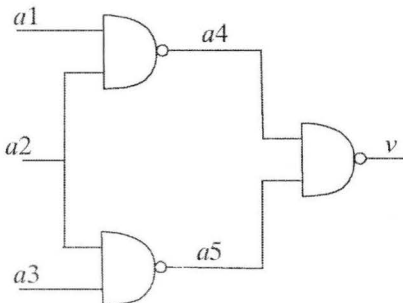


Рис.4. Пример схемы и ее логических ограничений

В предлагаемом методе вместо полной записи функции  $F$  в форме СП задан набор термов, каждый из которых отвечает за запрещенную комбинацию сигналов. На рис.4 показан пример схемы и ее логических ограничений. Пусть узел  $v$  переключается из состояния 1 в состояние 0 (fall), а агрессоры ( $a1-a5$ ) – из состояния 0 в состояние 1 (rise), тогда логические ограничения для анализа помехи задержки можно записать как:  $v \cdot a2$ ,  $v \cdot a1 \cdot a2$ ,  $v \cdot a2 \cdot a3$ ;  $a1 \cdot a4$ ,  $a2 \cdot a4$ ,  $a2 \cdot a5$ ,  $a3 \cdot a5$ ;  $a1 \cdot a2 \cdot a4$ ,  $a2 \cdot a3 \cdot a5$ . На основе имеющихся ограничений с помощью правила резолюции получаем новые:  $v \cdot a4$ ,  $a1 \cdot a2 \cdot a4 \rightarrow a1 \cdot a2 \cdot v$ ;  $v \cdot a5$ ,  $a2 \cdot a3 \cdot a5 \rightarrow a2 \cdot a3 \cdot v$ .

Логические ограничения, включающие только две переменные, являются ПЛИ [5, 6]. Например, на рис.4 ПЛИ  $v \cdot \bar{a}_2$  запрещает комбинацию  $v = 1$ ,  $a_2 = 0$ .

Функции, определяющие все возможные логические ограничения, громоздки для применения в практических целях и не отвечают вероятности наихудшего случая появления всех возможных переключений узлов при реальном функционировании цифровых СБИС.

В методе принято во внимание наличие двух типов логических ограничений в цифровых СБИС: ограничения между входными сигналами и ограничения, связанные со структурой схемы.

Первый тип ограничений относится к кодированию входного сигнала и задается разработчиком СБИС. Второй тип ограничений следует из логики функционирования схемы. Например, вентиль, выполняющий функцию  $x = \overline{a \cdot b}$ , имеет три логических ограничения  $\overline{a} \cdot \overline{x}$ ,  $\overline{b} \cdot \overline{x}$ ,  $a \cdot b \cdot x$ . Это означает, что выход не может быть равен 0, если любой из входных сигналов равен 0, и не может быть равен 1, если оба входных сигнала равны 1 [8, 9]. На рис.5 показан процесс получения логических ограничений для двухвходового вентиля И-НЕ.

При использовании начального набора логических ограничений (для транзисторов или вентилях) применимы правила булевой алгебры для получения остальных логических ограничений в схеме. Получение новых логических отношений на основе существующих описано в [10]. Один из алгоритмов решения основан на повторяющемся применении правила резолюции:

$$a \cdot b = 0, \quad \overline{a} \cdot C = 0 \rightarrow B \cdot C = 0,$$

где  $B$  и  $C$  – произвольные логические выражения.

Однако применение этого правила для СБИС также может быть избыточным, а в отдельных случаях может привести к генерации одних и тех же логических ограничений. Тогда более эффективным может оказаться эвристический подход, описанный в [8, 9].

**Расчет влияния помехи на время задержки распространения сигнала в цифровых СБИС «на наихудший случай».** Расчет влияния помехи на время задержки распространения сигнала в цифровых СБИС «на наихудший случай» предполагает определение реального набора МРНА –  $A_i$ . Рассмотрим путь распространения сигнала  $P$ , состоящий из узлов жертв  $\{v_1, v_2, \dots\}$  и агрессоров  $A = \bigcup A_i$ , где  $A_i$  – набор узлов-агрессоров, индуцирующих помеху на узел-жертву  $v_i$ .

Пусть каждый узел-жертва  $v_i$  переключается из  $x_i^I$  в  $x_i^F$ , а каждый агрессор  $a_{i,j}$  переключается из  $y_{i,j}^I$  в  $y_{i,j}^F$ . Пусть векторы начального и конечного состояния узлов-жертв  $X^I$  и  $X^F$ , а агрессоров  $Y^I$  и  $Y^F$ . Из набора логических ограничений  $C$  можно получить наборы  $C^I$  и  $C^F$ , подставляя начальные и конечные значения показателей узлов-жертв в  $C$ . Тогда задача расчета  $\Delta D_{\max}$  и  $A_R$  может быть сформулирована как задача оптимизации:  $\Delta D_{\max} = \max \sum_{a_{i,j} \in A_R \subseteq A} \Delta D_{i,j}$ .

Если все ограничения представляют собой ПЛИ, то можно построить граф парных ограничений  $G_C = (A, E_C)$ , в котором набору вершин соответствует набор агрессоров  $A_r$ . Каждая вершина  $a_i$  имеет вес, равный помехе задержки, вносимой данным узлом-агрессором. Ребро  $e = (a_i, a_j) \in E_C$  соответствует ПЛИ  $a_i^{a_i} a_j^{b_j}$ , которая ограничивает агрессоры  $a_i$  и  $a_j$  от совместного влияния на проводящий путь. Задача нахождения независимого множества максимального веса (НММВ) для графа  $G_C = (A, E_C)$  – NP-полная, но в теории графов существуют ее эффективные решения при некоторых ограничивающих условиях [11].

Когда набор узлов-агрессоров мал (до 10), могут быть перечислены все комбинации переключения агрессоров. Для этого подхода важно быстро проверять выполнимость логических ограничений. В [8, 9] эта задача для функциональных помех решена с помощью характери-

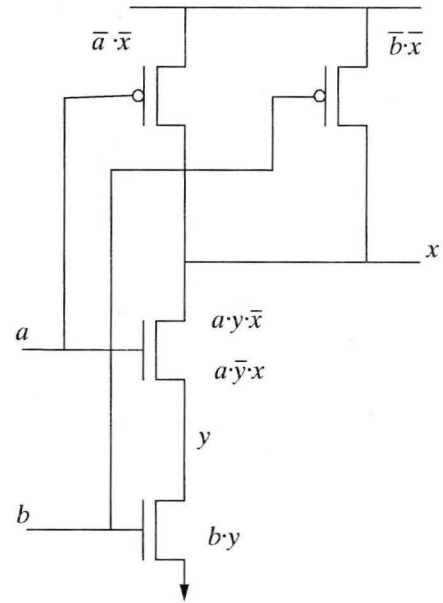


Рис.5. Логические ограничения для вентиля NAND2 (начальные:  $\overline{a} \cdot \overline{x}$ ,  $\overline{b} \cdot \overline{x}$ ,  $a \cdot \overline{y} \cdot x$ ,  $a \cdot y \cdot \overline{x}$ ,  $b \cdot y$ ; полученные:  $b \cdot y$ ,  $a \cdot \overline{y} \cdot x \rightarrow a \cdot b \cdot x$ )

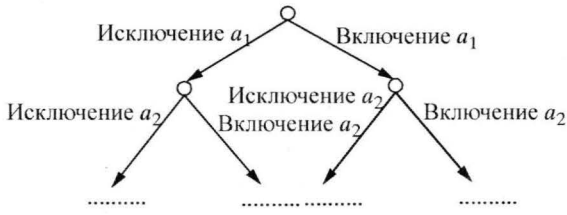


Рис.6. Дерево решения для алгоритма ветвей и границ

ческих минимизированных упорядоченных диаграмм двоичных решений, описывающих логические ограничения схем. Этот подход, однако, не практичен при одновременном анализе большого количества кластеров.

Для достижения максимально точного и эффективного решения задачи предлагается алгоритм обхода дерева решений в глубину (рис.6).

Стратегию формирования ограничений для метода ветвей и границ позволяют реализовать следующие свойства:

- если набор  $A_r$  может индуцировать помеху задержки  $w(A_r)$  и удовлетворяет логическим ограничениям  $C$ , то МРНА  $A_R$  будет индуцировать помеху задержки  $w(A_R)$  такую, что  $w(A_r) \leq w(A_R)$ ;

- пусть набор агрессоров  $A_r$  разделен на два непересекающихся подмножества  $A_1$  и  $A_2$ , так что реализуемые наборы:  $A = A_1 \cup A_2$ ,  $A_{r1} \subseteq A_1$ ,  $A_r \subseteq A$ ; если выполняется неравенство  $w(A_r) > w(A_{r1}) + w(A_2)$ , то МРНА  $A_R$  не является подмножеством  $A_{r1} \cup A_2$  ( $A_R \not\subseteq A_{r1} \cup A_2$ ).

С учетом этих свойств реализуется алгоритм метода ветвей и границ для  $(A, i, A_S, A_R)$ , для которого входными данными является полный набор узлов-агрессоров  $A = \{a_1, a_2, \dots\}$ , порядковый номер обрабатываемого агрессора, текущие выбранные агрессоры  $A_S = \{a_{s1}, a_{s2}, \dots\}$  и текущий МРНА  $A_r = \{a_{r1}, a_{r2}, \dots\}$ :

Шаг 1.  $UNPROCESSED = \{a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n\}$  и не равно пустому подмножеству:

- если добавление  $a_{i+1}$  к  $A_S$  не противоречит логическим ограничениям и  $w(A_S) + w(UNPROCESSED) > w(A_r)$ , то  $A'_S = A_S \cup \{a_{i+1}\}$ .

- если  $w(A'_S) > w(A_r)$ , то следует улучшить текущий МРНА  $A_r = A'_S$ .

Улучшение текущего МРНА  $A_r$ :  $A_r = \text{Branch\_and\_Bound}(A, i+1, A_S, A_r)$ .

Шаг 2.  $UNPROCESSED = \{a_{i+2}, a_{i+3}, \dots, a_n\}$  и не равно пустому подмножеству:

- если  $w(A_S) + w(UNPROCESSED) > w(A_r)$ , то надо улучшить текущий МРНА  $A_r = \text{Branch\_and\_Bound}(A, i+2, A_S, A_r)$ .

Шаг 3. Возвращается  $A_r$ .

Метод ветвей и границ позволяет достаточно точно определять МРНА, но для «наихудшего случая» время на его выполнение возрастает по экспоненте.

Предлагается эвристическая модификация метода ветвей и границ таким образом, чтобы он постоянно улучшал приближение МРНА. Тогда алгоритм использует вычисление верхней границы возможной помехи  $w(A_S) + w(UNPROCESSED) > w(A_r)$  на шаге 1.

Во время выполнения алгоритм постоянно обновляет верхнюю границу для заданного набора узлов-агрессоров. При остановке поиска алгоритм выдаст на выходе лучшее приближение для МРНА. Полезным критерием для остановки поиска является достижение полученной величины помехи такого значения, что полная задержка сигнала на выбранном пути меньше, чем требуемая. Другой полезный критерий – это максимальная ошибка полученной аппроксимации:

$$e = w(A_S) + w(UNPROCESSED) - w(A_r).$$

Еще один эвристический алгоритм может быть получен с помощью подхода для МРНА, позволяющего исключать любые логические ограничения, т.е. можно исключить часть логических ограничений так, чтобы разделить полный набор агрессоров  $A$  на несколько непересекающихся подмножеств  $A_k$ , причем любые логические ограничения включают в себя узлы-

агрессоры только одного подмножества. Таким образом, задача может быть разбита на независимые части. Простейшее разделение – это разбиение полного набора узлов-агрессоров на отдельные кластеры (одна жертва, несколько агрессоров) и анализ их по отдельности. Лучшее приближение можно получить с помощью более сложных алгоритмов разбиения. Например, разбиение можно выполнить с помощью алгоритмов, использующихся для разбиения схемы на этапе физического проектирования СБИС.

**Реализация и экспериментальные результаты.** Реализация предложенных методов описана в [2]. В таблице представлены сравнительные результаты для следующих алгоритмов:

- алгоритм с разделением набора агрессоров на отдельные кластеры, что решает проблему поиска МРНА, игнорируя логические ограничения между кластерами (3-я колонка);

- улучшенный эвристический алгоритм с разделением на кластеры, который дополняет алгоритм с разделением агрессоров на отдельные кластеры межкластерными логическими ограничениями (4-я колонка);

- алгоритм, решающий задачу поиска НММВ для всех узлов-агрессоров цепи, используя только ПЛИ (5-я колонка);

- алгоритм, использующий метод ветвей и границ (6-я колонка).

#### Результаты экспериментов по анализу помехи задержки

Схема	Число транзисторов в схеме	Помеха, оставшаяся от первоначальной (%)			
		Раздельный анализ кластеров	Эвристический анализ	Анализ с помощью НММВ	Метод ветвей и границ
1	2	3	4	5	6
C499	1572	88,61	70,07	75,65	74,97
C1355	2260	87,91	78,90	75,65	75,48
C1908	3322	91,24	87,10	85,72	85,39
C2670	4990	88,65	86,45	85,65	85,44
cnt_1	350	68,83	35,59	33,29	27,98
cnt_0	340	70,28	44,67	40,42	33,46
cnt_ones	372	63,08	36,05	32,47	26,51
cnt_zeros	352	69,23	43,40	37,75	33,78
cla	1008	94,06	88,10	84,05	83,03

Колонки 3–6 показывают оставшуюся временную задержку в цепи от первоначальной после применения каждого из четырех алгоритмов. Результаты усреднены по 20 произвольно выбранным наихудшим (самым длинным) путям схем.

Опыт применения алгоритма показал, что производительность метода ветвей и границ резко падает при количестве узлов-агрессоров больше 100. Алгоритм, использующий НММВ, хорошо работает для задач с количеством агрессоров до 300. Другие два алгоритма работают эффективно для любого количества узлов-агрессоров.



Таким образом, предложенный новый подход к анализу помех, влияющих на задержку в цифровых схемах, является значительно более мощным инструментом, чем применявшиеся ранее методы. Точность линейной модели для задачи оптимизации подтверждена экспериментальными данными. На практике для решения задачи поиска МРНА применены несколько эвристических алгоритмов для сравнительно точного расчета влияния помех на время задержки распространения сигналов тестовых цифровых СБИС с большими наборами узлов-жертв.

Предложенные алгоритмы и методики реализованы в программном обеспечении, которое используется для анализа помехоустойчивости высокоскоростных цифровых СБИС.

### Литература

1. *Shepard K.L.* Design methodologies for noise in digital industrial circuits // DAC, 1998. – P. 94–99.
2. Clarinet: a noise analysis tool for deep submicron design / *R.Levy, D.Blaauw, G.Braca et al.* / DAC, 2000. – P. 63–68.
3. *Rubio A., Itazaki N., Xu X., Kinoshita K.* An approach to the analysis and detection of crosstalk faults in digital VLSI circuits // IEEE Trans. On CAD. – 1997. – Vol. 13, № 3.
4. Chen P., Keutzer K. Towards true crosstalk noise analysis // ICCAD, 1999. – P. 132–137.
5. False noise analysis using logic implications / *A.Glebov, S.Gavrilov, D.Blaauw et al.* // ICCAD, 2001. – P. 515–521.
6. *Гаврилов С.В., Глебов А.Л., Стемпковский А.Л.* Анализ помехоустойчивости цифровых схем на основе логических импликаций // Изв. вузов. Электроника. – 2002. – № 5. – С. 60–67.
7. Brown F.M. Boolean reasoning. – Kluwer Academic Publishers, 1990. – 337 p.
8. False noise analysis using resolution method / *A.Glebov, S.Gavrilov, D.Blaauw et al.* // ISQED, 2002. – P. 437–442.
9. *Гаврилов С.В., Глебов А.Л., Стемпковский А.Л.* Анализ фатальных помех в цифровых схемах на основе метода резолюций // Изв. вузов. Электроника. – 2004. – № 6. – С. 64–72.
10. *Robinson J.A.* A machine-oriented logic based on the resolution principle // J. of the ACM. – 1965. – 12(1). – P. 23–41.
11. *Loukakis E., Tsouros C.* An algorithm for the maximum internally stable set in a weighted graph // Intern. J. Computer Math. – 1983. – Vol. 13. – P. 117–129.

Статья поступила  
после доработки 25 апреля 2005 г.

**Соловьев Роман Александрович** – аспирант ИППМ РАН. Область научных интересов: схемотехника и проектирование, анализ помехоустойчивости СБИС, информационные технологии.

**Глебов Алексей Львович** – доктор технических наук, заведующий сектором автоматизации логического проектирования ИППМ РАН. Область научных интересов: методы логического синтеза, анализ помехоустойчивости и оптимизация СБИС.

**Гаврилов Сергей Витальевич** – кандидат технических наук, заведующий сектором автоматизации топологического проектирования ИППМ РАН. Область научных интересов: методы оптимизации СБИС, методы быстрого электрического моделирования, символический анализ схем, анализ помехоустойчивости.

# МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.396.965

## Алгоритм синтеза радиолокационных изображений при малых углах переднебокового обзора

Г.Э.Широ, С.П.Романов

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Предложен алгоритм синтеза радиолокационных изображений, основанный на методе прямой свертки траекторного сигнала с несколькими (до 5) импульсными характеристиками согласованных фильтров. Алгоритм позволяет получить радиолокационные изображения при малых углах переднебокового обзора –  $5^\circ$  и менее. Приведена оценка аппаратной реализации.

При получении радиолокационных изображений (РЛИ) с помощью радиолокаторов бокового обзора с синтезированием апертуры антенны (РСА) важно проводить съемку под острыми углами переднебокового обзора. Известно [1], что наиболее «дешевым» методом цифрового синтеза РЛИ является метод гармонического анализа. Однако, как показано в [2], данный метод применим лишь при сравнительно «тупых» углах ( $>30^\circ$ ) переднебокового обзора.

В настоящей работе процедура синтеза РЛИ реализована сложным, но более точным методом прямой свертки, который, как подтверждено результатами моделирования, позволяет получить РЛИ с высоким разрешением при углах  $5^\circ$  и менее. Ограничением к дальнейшему уменьшению углов может быть только неприемлемое время накопления исходного радиолокационного сигнала.

**Принцип действия и основные характеристики РСА.** Принцип действия РСА показан на рис.1, на котором изображена радиолокационная съемка с помощью самолетной станции с антенной, реализованной в виде фазированной решетки, изначально ориентированной в направлении полета.

В качестве примера взяты следующие условия съемки: высота полета  $H = 10$  км; наклонная дальность  $R = 50$  км;  $L_m \times D_m = 1500 \times 11000$  м – максимальные размеры «пятна радиояркости», формируемого антенной на земле в соответствии с диаграммой направленности; горизонтальный размер реальной антенны, изначально ориентированной в направлении полета  $l = 1$  м; длина волны радиолокатора  $\lambda = 3$  см; угол переднебокового обзора  $\alpha$ ; угол визирования  $\beta$ .

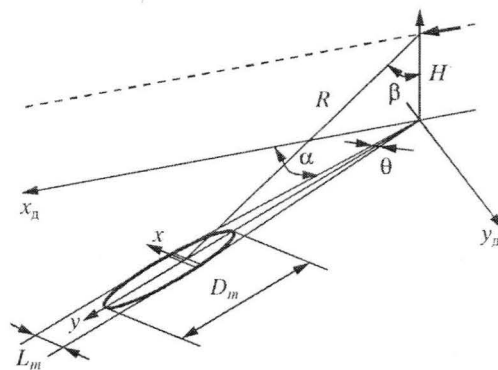


Рис.1. Принцип действия РСА

Радиолокационное изображение синтезируется в координатах  $x$  (азимут) и  $y$  (дальность). Качество РЛИ определяется разрешением по осям  $x, y$ :  $\rho_x$  – разрешение по азимуту;  $\rho_y$  – разрешение по дальности.

Разрешение  $\rho_y$  по дальности реализуется временным разделением сигналов-откликов от различных отражателей (в простейшем случае – точечных), облученных зондирующим импульсом с длительностью  $t_{\text{и}}$ .

Численные значения  $\rho_y$  определяются по формуле  $\rho_y = \frac{1}{2} t_{\text{и}} c \sin \beta$ , где  $c$  – скорость света;  $\beta$  – угол визирования (см. рис.1).

Например, при  $t_{\text{и}} = 35,7$  нс (сжатый импульс) и  $\beta = \arccos(H/R) \approx 78,5^\circ$   $\rho_y \approx 5,3$  м.

Разрешение  $\rho_x$  по азимуту реализуется методами цифровой обработки сигналов [3].

**Алгоритм азимутального синтеза.** Вычислительный процесс азимутального синтеза сводится к процедуре дискретной свертки траекторного сигнала  $\dot{s}(pX)$ , где  $p = -N, \dots, + (N-1)$ , с импульсной характеристикой  $\dot{h}(kX)$ , где  $k = -N/2, \dots, 0, \dots, + (N/2-1)$ , согласованного фильтра:

$$\dot{s}_{\text{вых}}(nX) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} \dot{h}(kX) \dot{s}(n-k)X, \text{ где } n = -N/2, \dots, 0, \dots, + (N/2-1). \quad (1)$$

Для формирования строки изображения, содержащей  $N$  значений  $\dot{s}_{\text{вых}}(nX)$ , где  $n = -N/2, \dots, 0, \dots, + (N/2-1)$ , необходимо  $2N$  отсчетов траекторного сигнала  $\dot{s}(pX)$ ,  $p = -N, \dots, + (N-1)$  равной дальности. Здесь дискрет отсчетов по азимуту  $X = TV$ , где  $T$  – период зондирующих импульсов;  $V$  – составляющая скорости самолета в азимутальном направлении (в рассмотренном примере величина  $X$  принята равной 0,5 м), число отсчетов траекторного сигнала, необходимое для синтеза одной точки изображения:  $N = L/X$ , где  $L$  – длина синтезированной апертуры антенны ( $L$  принята равной 250 м). Тогда  $N = 500$ .

Импульсная характеристика согласованного фильтра  $\dot{h}(kX)$  вычисляется как комплексно-сопряженная и зеркально отраженная функция точечного отражателя, помещенного в центр синтезированной полоски изображения.

Расчеты по формуле (1) позволяют получить изображение, равное длине синтезированной апертуры  $L$ . Кроме того, в поле зрения антенны в процессе накопления траекторного сигнала оказывается более длинная полоса  $L_m$ , определяемая диаграммой азимутальной направленности антенны:

$$L_m = 2R \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \approx R\theta.$$

Здесь угол раскрытия антенны  $\theta = \lambda/l$ , где  $l$  – горизонтальный размер антенны. В результате получаем:  $\theta = 0,03$  рад;  $L_m = 1500$  м.

Таким образом, можно поставить (и решить) задачу синтеза строки изображения по одному и тому же набору отсчетов траекторного сигнала  $\dot{s}(pX)$  на длине  $L_m$  за вычетом длины синтезированной апертуры  $L$ :  $L_c = L_m - L$ . Заметим, что на длине полета  $2L$  каждая точка участка  $L_c$  находится в зоне обзора антенны на протяжении по крайней мере длины синтезированной апертуры  $L$ , следовательно,  $L_c = 1250$  м.

Для получения строки длиной  $L_c$  достаточно выполнить вычисления по формуле (1)  $L_c/L$  раз. В примере  $L_c/L = 5$ .

При этом необходимо использовать пять различных импульсных характеристик  $\dot{h}_{-2}, \dot{h}_{-1}, \dot{h}_0, \dot{h}_{+1}, \dot{h}_{+2}$ , вид которых качественно (но не количественно) представлен на рис.2.

Выбор величины дискрета отсчетов по азимуту  $X$  определяется пространственной частотой Доплера траекторного сигнала на краях строки  $L_c$  [1]:  $X \leq \frac{\lambda R}{2L_c}$ .

В рассматриваемом примере  $X \leq 0,6$  м.

В целях повышения энергетики  $X$  выбирается равной 0,125 м, а на этапе предварительной фильтрации – децимации с коэффициентом деления на 4 доводится до значения 0,5 м.

Величина азимутального разрешения [1]:  $\rho_x = \frac{1}{2} \frac{\lambda R}{L}$ . Тогда  $\rho_x = 3$  м.

**Аппаратная реализация алгоритма азимутального синтеза.** Аппаратная реализация алгоритма азимутального синтеза основана на вычислении процедуры свертки с использованием прямого и обратного дискретного преобразований Фурье  $\mathfrak{F}, \mathfrak{F}^{-1}$ :

$$\dot{s}_{\text{вых}}(nX) = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \mathfrak{F}[\dot{s}(nX)] \mathfrak{F}[\dot{h}(nX)] \right\}, \text{ где } n = 0 \dots (2N - 1). \quad (2)$$

Для получения  $N$  достоверных значений выходного сигнала  $\dot{s}_{\text{вых}}$  длина преобразований  $\mathfrak{F}, \mathfrak{F}^{-1}$  должна быть выбрана равной  $2N$ . В рассматриваемом примере  $N = 500$ ,  $2N = 1000$ .

Достоверные значения выходного сигнала  $\dot{s}_{\text{вых}}$  выбираются из середины выходной последовательности, вычисленной по формуле (2).

На рис.3 представлена блок-схема аппаратной реализации алгоритма азимутального синтеза с пояснением процесса формирования исходной информации, необходимой для работы алгоритма и представленной в виде двух массивов ОЗУ: ОЗУ<sub>1</sub> и ОЗУ<sub>2</sub>, объем каждого из которых  $V_{\text{ОЗУ}} = NM$  слов. Здесь число дискретов массива по азимуту  $N = L/X$ , где  $L$  – длина синтезированной апертуры антенны;  $X$  – дискрет отсчетов по азимуту. Число дискретов по дальности  $M = D/\rho_y$ , где  $D$  – размер изображения по дальности. В примере  $N = 500$ ,  $M = 2696$ . При аппаратной реализации выбираем число  $N = 512$  (ближайшая степень двойки).

Таким образом, с учетом 16-разрядных реальной и мнимой частей каждого отсчета  $V_{\text{ОЗУ}} = 42,125$  Мбит.

Алгоритм выбирает информацию построчно из двух массивов ОЗУ и обрабатывает их по конвейерному принципу (см. рис.3). После обработки всех  $M$  строк, содержащихся в двух ОЗУ, на выходе конвейера формируется парциальный кадр изображения. Одновременно с работой вычислительного конвейера проводится накопление очередного массива информации ОЗУ. Следующий кадр изображения формируется из инфор-

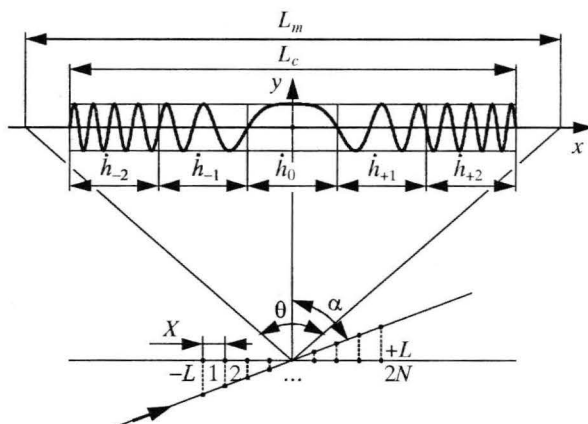


Рис.2. Иллюстрация алгоритма азимутального синтеза



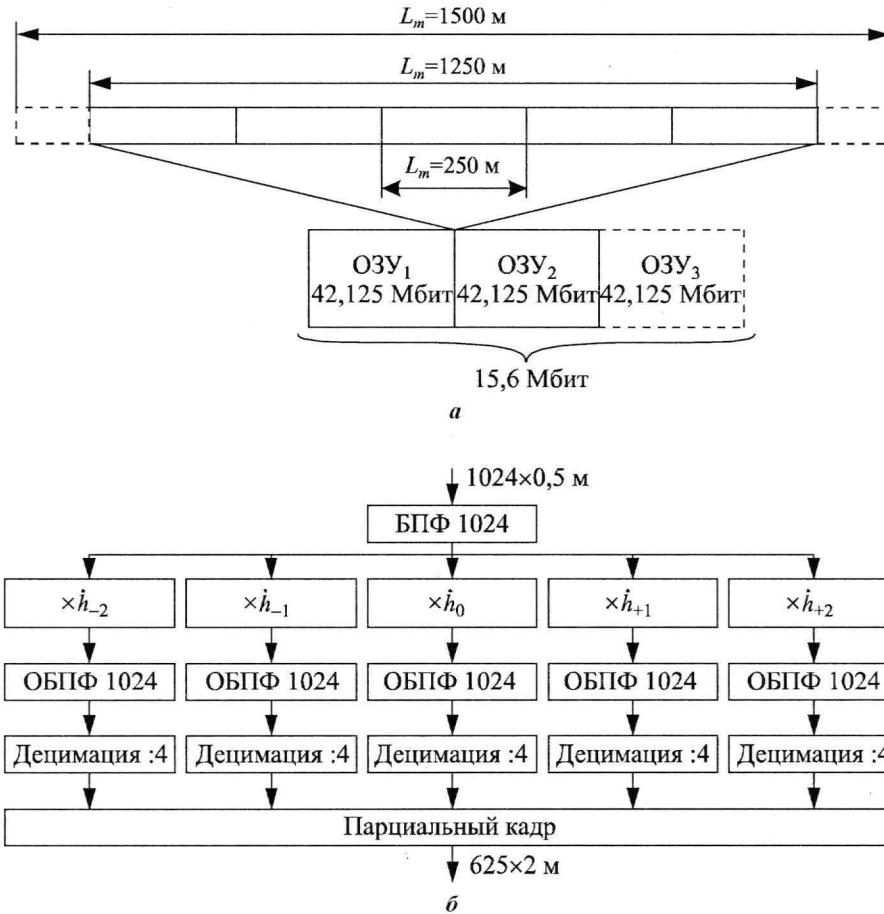


Рис.3. Процесс накопления исходной информации в ОЗУ (а), блок-схема аппаратной реализации алгоритма азимутального синтеза (б)

мации, содержащейся в массивах  $ОЗУ_2$ ,  $ОЗУ_3$  и т.д., со смещением на одно  $ОЗУ$ . Число вычислительных этапов конвейера алгоритма соответствует полученному по формуле (2). При этом преобразования реализуются в виде прямого и обратного «быстрого преобразования Фурье» (БПФ, ОБПФ).

После выполнения процедуры БПФ относительно строки сигнала  $\dot{s}_{\text{вх}}(nX)$  длиной  $1024$  вычислительный процесс разветвляется на 5 потоков в соответствии с 5 импульсными характеристиками  $\dot{h}_{-2}$ ,  $\dot{h}_{-1}$ ,  $\dot{h}_0$ ,  $\dot{h}_{+1}$ ,  $\dot{h}_{+2}$ . Выходная децимация с коэффициентом деления на 4 позволяет получить изображения с дискретом по азимуту  $X_{\text{вых}} = 2$  м. Размер результирующего парциального кадра  $N_{\text{вых}} \times M = 625 \times 2696$  дискретов, или с учетом величины дискрета по дальности  $Y = 2,625$  м, размер парциального кадра  $1250 \times 7077$  м.

Частоты входного  $f_{\text{вх}}$  и выходного  $f_{\text{вых}}$  потоков вычислительного конвейера могут быть оценены исходя из скорости полета самолета  $V$ :

$$f_{\text{вх}} = \frac{V}{L} N_{\text{вх}} M; \quad f_{\text{вых}} = \frac{V}{L} N_{\text{вых}} M.$$

Например,  $V = 250$  м/с, тогда  $f_{\text{вх}} \approx 1,4$  МГц;  $f_{\text{вых}} \approx 1,7$  МГц.

**Сравнение метода свертки с методом гармонического анализа.** Процедура азимутального синтеза методом гармонического анализа выполняется в соответствии с формулой [1]:

$$\dot{s}_{\text{вых}}(nX) = \mathfrak{F}\left\{\dot{s}(nX)\dot{h}_0(nX)\right\}, \text{ где } n = 0 \dots (N-1). \quad (3)$$

Исходной информацией для вычисления являются последовательности  $\dot{s}(nX)$ ,  $\dot{h}_0(nX)$  – сигнал и импульсная характеристика, совпадающие с таковыми в рассмотренном выше методе свертки. Заметим, что в качестве импульсной характеристики  $\dot{h}_0(nX)$  здесь используется лишь одна из пяти – центральная характеристика (см. рис.2).

Выходная последовательность по формуле (3)  $\dot{s}_{\text{вых}}(n\Delta X)$  содержит  $N$  значений –  $N$  точек строки изображения, отстоящих друг от друга на расстоянии  $\Delta X$ ; величина  $\Delta X = \rho_x$  равна азимутальному разрешению [1]. В примере  $N = 512$ ,  $\rho_x = 3$  м.

Из полученной строки изображения необходимо выбрать  $N_{\text{вых}} = L_c / \rho_x$  достоверных точек так, чтобы результирующая строка не выходила за пределы «пятна радиояркости»  $L_c$ . В нашем примере  $N_{\text{вых}} = 1250/3 = 417$ .

Сравнение формул (3) и (2), в особенности с учетом блок-схемы аппаратной реализации метода свертки (см. рис.3), говорит о существенном преимуществе метода гармонического анализа по сравнению с методом свертки по вычислительным затратам. Однако, как показывают результаты моделирования, проведенные для исходных данных в соответствии с рассматриваемым примером (рис.4), метод гармонического анализа удовлетворительно «работает» при углах переднебокового обзора не менее  $30^\circ$ .

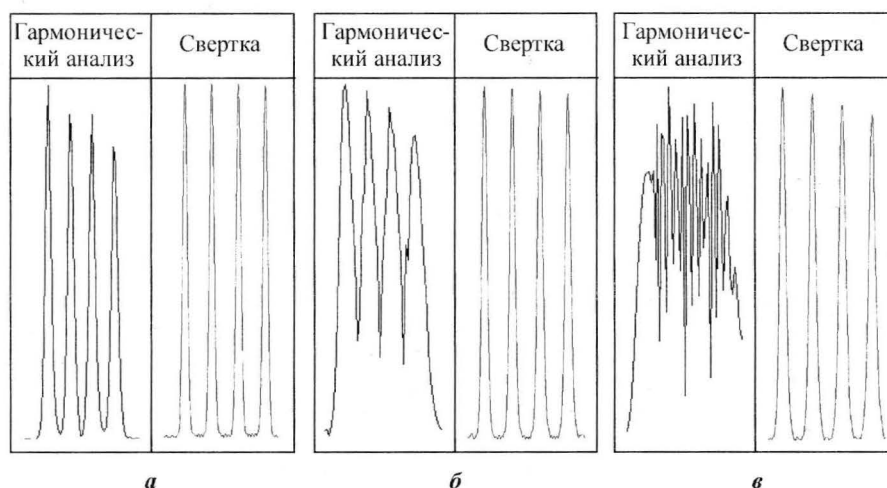


Рис.4. Сравнение результатов моделирования методов азимутального синтеза – гармонического анализа и свертки при углах переднего обзора  $\alpha$ : а –  $30^\circ$ ; б –  $10^\circ$ ; в –  $5^\circ$ . (Модель местности: 4 точечные цели на расстоянии 25 м)

Итак, для получения высококачественных РЛИ при синтезе с острыми углами переднебокового обзора  $\alpha$  необходимо использовать метод свертки. Процедура прямой свертки реализуется для нескольких (до 5) импульсных характеристик, что позволяет из одного траекторного сигнала получить несколько фрагментов изображений.

## Литература

1. Антипов В.Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В.Т.Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
2. Муш Б.С., Альтман Л.С. Обработка сигналов в квазиголографических системах как обратная задача // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. 29, № 7. – С. 1242–1251.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

Статья поступила  
3 ноября 2004 г.

**Широ Георгий Эдуардович** – доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники МИЭТ. *Область научных интересов:* системы автоматизированного проектирования; логическое и конструкторское проектирование микросхем; цифровая обработка сигналов; разработка специализированных процессоров синтеза радиолокационных изображений.

**Романов Сергей Павлович** – инженер-электроник отраслевой лаборатории вычислительных систем и систем управления (ОЛВС и СУ) при МИЭТ. *Область научных интересов:* специализированные многопроцессорные системы; комбинированная обработка сигналов в системах радиолокации; языки описания аппаратуры высокого уровня.



Издательско-полиграфический комплекс  
Московского государственного института электронной техники  
информирует



Вышло в свет учебное пособие

### В.З. Гребенкин Контроль качества сборки изделий



ISBN 5-7256-0402-0  
Формат 60 x 84 1/16,  
объем 152 с.: ил.

Изложены материалы по контролю качества сборки электронного прибора с подложкой при климатических воздействиях и качества сборки механизмов. Приведены теоретические обоснования и задания для курсовых работ по контролю качества сборки изделий; для каждого задания составлены методика, а также примеры выполнения. Приведен цикл лабораторных работ по анализу, измерениям, испытаниям и контролю изделий, практические результаты которых используются при выполнении заданий в курсовых работах.

Предназначено для студентов приборостроительных, электротехнических и радиотехнических вузов, изучающих дисциплины "Методы и средства измерений, испытаний и контроля", "Детали машин и приборов", "Теоретическая и прикладная механика". Может быть использовано в курсовом и дипломном проектировании по аналогичным дисциплинам и спецкурсам, где предусмотрена оценка качества сборки изделий.

## Первичная обработка управляющих сигналов с времяимпульсной модуляцией в условиях наличия комбинированной помехи

*В.Ю.Кочетков, А.Л.Переверзев, Ю.В.Савченко*

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Изложены результаты разработки способа обнаружения импульсов командного сигнала с времяимпульсной модуляцией и фильтрации декодированных команд управления в условиях воздействия комбинированной помехи. Рассмотрены особенности конкретной реализации на примере системы дистанционного управления беспилотным летательным аппаратом.

Сигналы с времяимпульсной модуляцией (ВИМ) нашли широкое применение в системах дистанционного управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА). ВИМ-сигналы состоят из пачек импульсов одинаковой длительности и амплитуды, которые следуют с постоянным периодом. При этом команды управления определяются временными интервалами между импульсами в пределах каждой пачки.

Типовой тракт обработки ВИМ-сигнала на борту БЛА с применением цифровой техники можно представить следующим образом. Демодулированный сигнал от приемного устройства преобразуется в цифровую форму и поступает на вход устройства первичной обработки (УПО), которое включает в себя устройства фильтрации и обнаружения отдельных импульсов, а также декодер ВИМ-сигнала. Вместе с полезным сигналом на вход УПО могут поступать помехи, обусловленные условиями эксплуатации БЛА, а также ошибочными ситуациями на борту и несовершенством элементной базы. Наиболее часто встречающиеся на практике типы помех – это белый и импульсный шум, а также флуктуации постоянной составляющей сигнала [1]. Сложная помеховая обстановка, а также требования к экономии ресурсов системы, приводят к постоянному совершенствованию существующих и разработке новых способов и устройств первичной обработки управляющих сигналов.

В настоящей статье рассмотрен способ первичной обработки ВИМ-сигнала, обеспечивающий эффективное использование ресурсов системы при работе в условиях воздействия комбинированной помехи. Под комбинированной помехой понимается аддитивная смесь белого нормального  $N(\mu, \sigma)$ , импульсного шума и флуктуаций постоянной составляющей сигнала. Импульсным шумом считается искажение сигнала выбросами малой длительности по сравнению с длительностью полезных импульсов. Выбросы разделены длительными интервалами, свободными от помехи.

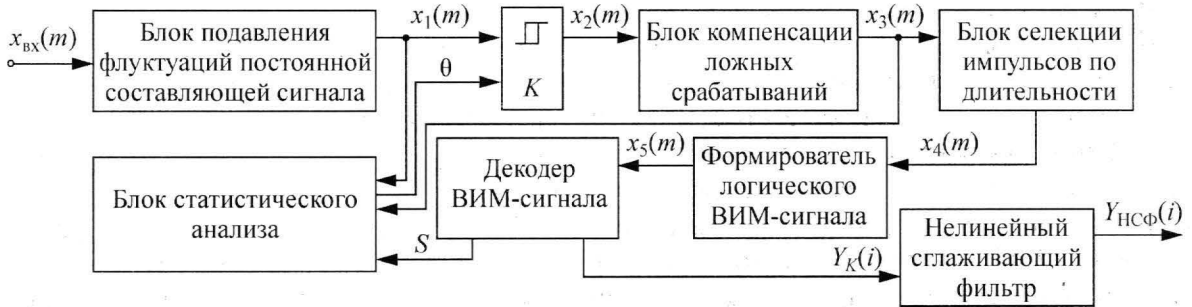
На вход УПО (рисунок) поступают цифровые отсчеты сигнала  $x_{\text{вх}}(m)$ , представляющего собой сумму ВИМ-сигнала и комбинированной помехи. Для подавления флуктуаций постоянной составляющей оценим средний уровень сигнала  $x_{\text{вх}}(m)$  и сформируем сигнал  $x_1(m)$  согласно выражению  $x_1(m) = x_{\text{вх}}(m) - \mu_x(j)$ , где  $\mu_x(j)$  – оценка среднего уровня на  $j$ -м шаге алгоритма:



$$\mu_x(j) = \begin{cases} \mu_x(j-1) + \Delta, & \text{если } \mu_x(j-1) < x_{\text{вх}}(m); \\ \mu_x(j-1), & \text{если } \mu_x(j-1) = x_{\text{вх}}(m); \\ \mu_x(j-1) - \Delta, & \text{если } \mu_x(j-1) > x_{\text{вх}}(m), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Delta = x_{\text{вх. max}} / (2^N - 1)$ ,  $N$  – разрядность сигнала  $x_{\text{вх}}$ . Период решения алгоритма (1) должен быть больше длительности импульсов и меньше максимально допустимого периода флуктуаций.

Сигнал  $x_1(m)$  поступает на один из входов компаратора и сравнивается с пороговым значением  $\theta = k\sigma$ , где  $k$  – коэффициент чувствительности компаратора. Значение  $\sigma$  рассчитывается блоком статистического анализа на основе обучающей выборки сигнала  $x_1(m)$ . Проводить выборку целесообразно во время пауз между пачками полезного сигнала. Для этого по окончании каждой пачки или при потере сигнала декодер выдает сигнал  $S$ , который запускает механизм формирования  $\theta$ . Сигналом  $x_3(m)$  можно временно блокировать формирование выборки для подавления импульсов помехи на входе блока статистического анализа.



Блок-схема устройства первичной обработки ВИМ-сигнала

Эффективность применения данного способа обнаружения по амплитуде определяется корректным выбором коэффициента чувствительности  $k$  из условия минимизации вероятности ложного срабатывания компаратора [2, 3]:

$$p_{\text{л.с1}}(k) = (1 - p_1)P\{n > \theta\} + p_1P\{n + s < \theta\} = (1 - p_1)P\left\{\frac{n}{\sigma} > k\right\} + p_1P\left\{\frac{n}{\sigma} < k - a\right\}, \quad (2)$$

где  $a$  – отношение сигнал/шум на входе компаратора;  $p_1$  – априорная вероятность передачи импульса. В случае нормального распределения шумовой составляющей сигнала минимум функции  $p_{\text{л.с1}}(k)$  достигается при

$$k = 0,5a - (1/a) \ln[p_1 / (1 - p_1)].$$

После сравнения сигнала  $x_1(m)$  с пороговым уровнем шума получаем логический сигнал, искаженный результатами ложных срабатываний компаратора и импульсной помехой, амплитуда которой превысила порог срабатывания. Ложные срабатывания компаратора имеют импульсный характер, что позволяет применить для их подавления медианную фильтрацию, являющуюся эффективным средством борьбы с импульсным шумом [4, 5]. Помимо устранения собственных шумов обнаружителя, блок компенсации ложных срабатываний позволяет полностью подавить импульсную помеху, присутствующую во входном сигнале, при условии, что количество искаженных отсчетов меньше  $(M - 1)/2$ , где  $M$  – количество отсчетов в апертуре фильтра [5]. Исходя из того,

что число искаженных отсчетов  $l$  в апертуре имеет биномиальное распределение, получаем выражение для вероятности ошибки после медианной фильтрации:

$$P_{л.с2} = 1 - P(l \leq (M - 1) / 2) = 1 - \sum_{k=0}^{(M-1)/2} C_M^k P_{л.с1}^k (1 - P_{л.с1})^{M-k}. \quad (3)$$

Сигнал  $x_3(m)$  поступает на вход блока селекции импульсов по длительности, который основан на интегрировании входного сигнала и сравнении результата с эталонной длительностью импульса с учетом допустимых отклонений. Полную вероятность ошибки устройства обнаружения импульса можно оценить при помощи следующего выражения:

$$P_{ош} = (1 - p_1) \left( 1 - \sum_{k=0}^{t_n - h} C_{t_n + h}^k (P_{л.с02})^k (1 - P_{л.с02})^{t_n + h - k} \right) + p_1 \left( 1 - \sum_{k=0}^{h-1} C_{t_n + h}^k (P_{л.с12})^k (1 - P_{л.с12})^{t_n + h - k} \right), \quad (4)$$

где  $P_{л.с02}$  и  $P_{л.с12}$  – вероятности ошибки при отсутствии и наличии импульса после медианной фильтрации, рассчитанные согласно выражениям (2) и (3);  $t_n$  и  $h$  – количество цифровых отсчетов в эталонном импульсе и допустимом отклонении реальной длительности импульса от эталонной. Длительность, которой соответствует  $t_n \pm h$  цифровых отсчетов, считаем недопустимой.

Формирователь логического ВИМ-сигнала запускается по каждому переднему фронту сигнала  $x_4(m)$  и генерирует импульсы постоянной длительности, которая выбирается в соответствии с параметрами декодера. Как правило, декодер работает на частоте, которая в несколько раз меньше частоты дискретизации входного сигнала, поэтому длительность импульсов  $x_5(m)$  должна быть в несколько раз больше, чем у импульсов  $x_4(m)$ .

Декодер ВИМ-сигнала представляет собой устройство, преобразующее последовательность импульсов в значения команд и данных. Основными элементами структуры ВИМ-декодера являются ПЗУ и схема логической обработки (СЛО). ПЗУ используется для формирования сигналов, стробирующих возможные положения импульсов в пределах пачки, а СЛО – для проверки множества условий правильного приема [1].

Нелинейный сглаживающий фильтр (НСФ) введен в структуру рассматриваемого устройства для устранения «просечек» и резких перепадов амплитуды команд управления, возникающих из-за ошибок обнаружения, декодирования или формирования управляющего сигнала. Идея нелинейной фильтрации заключается в том, чтобы обрабатывать только искаженные отсчеты команд, не внося задержку на передачу верных отсчетов. Пусть  $Y_k(i)$  – последовательность декодированных команд,  $\Delta_k$  – допустимое приращение амплитуды команды за один такт управления, тогда сигнал на выходе нелинейного сглаживающего фильтра определяется выражением

$$Y_{НСФ}(i) = \begin{cases} Y_+(i), & \text{если } Y_k(i) > Y_+(i); \\ Y_k, & \text{если } Y_-(i) \leq Y_k(i) \leq Y_+(i); \\ Y_-(i), & \text{если } Y_k(i) < Y_-(i), \end{cases} \quad (5)$$

где  $Y_+(i) = Y_{ЛСФ}(i) + \Delta_k$ ,  $Y_-(i) = Y_{ЛСФ}(i) - \Delta_k$ ,  $Y_{ЛСФ}(i)$  – сигнал с выхода линейного сглаживающего фильтра (ЛСФ). Тип и параметры ЛСФ определяются особенностями сис-

темы управления конкретного БЛА [3]. Частота решения алгоритма (5) равна частоте следования пачек импульсов. Таким образом, импульсные выбросы, превышающие по амплитуде  $\Delta_k$ , будут ограничены, а резкие перепады большой длительности будут сглажены в соответствии с выбранным алгоритмом ЛСФ.

Результаты моделирования первичной обработки управляющего ВИМ-сигнала показали, что вероятность ошибки приема команд управления в условиях воздействия комбинированной помехи, когда отношение сигнал/шум больше либо равно 2, не превышает  $10^{-5}$ .

### Литература

1. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.
2. Харкевич А.А. Борьба с помехами. – М.: Наука, 1965 – 275 с.
3. Smith S.W. The scientist and engineer's guide to digital signal processing. – San Diego: California technical publishing, 1999. – 650 с.
4. Vaseghi S.V. Advanced digital signal processing and noise reduction. – NY.: John Wiley & sons, 2000. – 466 с.
5. Хуанг Т.С. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.

Статья поступила  
19 сентября 2005 г.

**Кочетков Василий Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов, микропроцессорные специализированные вычислительные устройства и автоматизированные системы управления.

**Переверзев Алексей Леонидович** – магистр техники и технологии, аспирант кафедры вычислительной техники МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов, микропроцессорные специализированные вычислительные устройства и автоматизированные системы управления.

**Савченко Юрий Васильевич** – доктор технических наук, профессор, декан факультета микроприборов и технической кибернетики МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов, микропроцессорные специализированные вычислительные устройства и автоматизированные системы управления.

### Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на **2006 г.** по каталогу «Газеты, журналы» Агентства «Роспечать» в любом почтовом отделении.

**Подписной индекс  
47570**

## Применение технологии «конфигурируемые системы на кристалле» для исследования рабочих режимов автомобильных двигателей внутреннего сгорания

*И.Н.Бурдинский, А.С.Миронов*

**Хабаровский государственный технический университет**

С использованием передовой технологии микроэлектронной техники «конфигурируемые системы на кристалле» разработан измерительный комплекс для исследования рабочих режимов автомобильных двигателей с электронной системой управления. Комплекс позволяет с высокой точностью фиксировать большие объемы информации о диагностических параметрах двигателя.

Непрерывное усложнение методов цифровой обработки требует не только экстенсивного роста показателей элементной базы (быстродействие, количество элементарных вентилей), но и новых архитектурных решений системного уровня интеграции. При создании современных информационно-измерительных систем особо остро стоит задача сочетания аппаратной и программной обработки. Для решения такого класса задач производителями микроэлектронной техники предлагается технология совмещения на одном кристалле процессорного ядра и массива программируемой логики – конфигурируемые системы на кристалле.

Разработанный комплекс для измерения и регистрации параметров работы автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) состоит из устройства сбора информации на базе стенда ЕВА07, предлагаемого ООО СКБ телевизионной техники (г. Санкт-Петербург) [1], и системы обработки информации и реконфигурации комплекса.

Основу стенда ЕВА07 представляет 32-разрядная реконфигурируемая система на кристалле (CSoC) Triscend A7S20 [2], включающая в себя основные блоки:

- процессорное ядро ARM7TDMI;
- быстродействующий кэш размером 8 Кбайт;
- быстродействующая память данных размером 16 Кбайт;
- блок сопряжения с внешней памятью (ROM, EEPROM, Flash, SRAM, SDRAM);
- стандартные периферийные устройства (контроллеры прямого доступа к памяти (ПДП), прерываний, UART, JTAG и т.д.);
- матрица конфигурируемой логики размером 2048 ячеек типа LUT (Look – Up Tables);
- до 252-х портов ввода/вывода;
- высокопроизводительная специализированная системная шина (CSI bus) с пропускной способностью до 455 Мбайт/с.

Система обработки информации и реконфигурации комплекса выполнена на базе переносного (или стационарного) компьютера класса IBM PC и представляет собой набор разработанного (программа начальной настройки и управления комплексом – инструмент пользователя) и поставляемого производителем технологии CSoC специализированного программного обеспечения (Fast Chip, Device Link Utility, GNU Compiler – инструмент разработчика). На рис.1 представлена структурная схема разработанного измерительного комплекса.



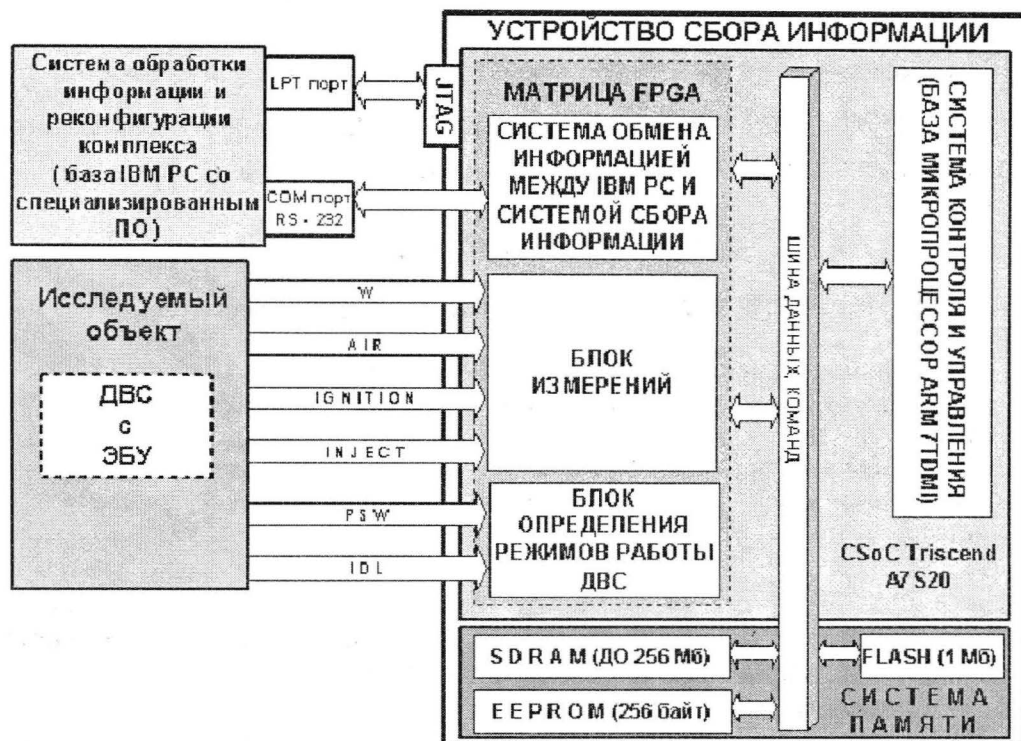


Рис.1. Структурная схема разработанного комплекса

Проектирование и конфигурирование устройства сбора информации осуществляется с помощью инструмента разработчика, входящего в состав системы обработки информации и реконфигурации комплекса. Отладка и программирование разработанного проекта проводится с использованием интерфейса JTAG (Joint Test Action Group).

Для инициализации устройства сбора информации используется программа начальной настройки и управления комплексом, написанная на языке C в среде программирования Visual.Net. Функции данной программы:

- организация связи с устройством;
- настройка (выбор) типов датчиков, установленных на двигателе;
- выбор режима измерений;
- прием собранной устройством информации и запись ее в файл.

Команды, инициирующие настройку, поступают от персонального компьютера по протоколу RS-232 к устройству сбора информации, где обрабатываются системой контроля и управления на базе процессора ARM7TDMI, которая, в свою очередь, настраивает:

- непосредственно систему обмена информацией (настройка канала DMA для передачи данных из устройства сбора информации в систему обработки);
- систему памяти, включающую в себя блок ОЗУ (SDRAM) для хранения результатов измерений, блок EEPROM, в котором хранятся начальные настройки параметров работы измерительного комплекса (возможна перезапись настроек во время работы), и блок Flash-памяти, который используется для сохранения конфигурации всего устройства сбора информации, когда комплекс отключен от питания;
- блок определения режимов работы ДВС, в котором происходит анализ текущего режима работы двигателя – холостой ход (сигнал IDL), режим частичных нагрузок или режим максимальной нагрузки (сигнал PSW);
- блок измерений.

Использование технологии CSoC Triscend A7S20 дает возможность оперативно, не изменяя общую структуру разработанного измерительного комплекса, добавлять или удалять из устройства сбора информации модули, отвечающие за обработку сигналов с того или иного датчика или блока управления (для исследования различных типов двигателей и их режимов работы), перенастраивать систему обмена информацией (изменять скорость передачи или формат пакета), при включении питания загружать одну из четырех запрограммированных в Flash-памяти конфигураций измерительного комплекса и т.д.

В данной реализации блок измерений разрабатывался для анализа параметров работы двигателей внутреннего сгорания с электронным блоком управления (ЭБУ), установленных на автомобилях марки Toyota. При этом основными параметрами для исследования режимов работы ДВС являются:

- обороты коленчатого вала двигателя – сигнал **W** – импульсный сигнал с датчика оборотов с периодом следования от 6 до 600 мс, что соответствует изменению оборотов двигателя в диапазоне 100 – 10000 об/мин;
- количество поступающего воздуха в двигатель – сигнал **AIR** – частотно-импульсный сигнал с датчика расхода воздуха; частота сигнала (от 5 до 15 кГц) пропорциональна объему воздуха, пройденного через датчик;
- количество поступающего в двигатель топлива (цикловая подача) – сигнал **INJECT** – импульсный сигнал (от 0,5 до 25 мс), определяющий длительность открытия топливных форсунок;
- угол опережения зажигания – сигнал **IGNITION** – вычисляется как временная задержка между появлением сигнала начала оборота **W** и окончанием сигнала **IGNITION** в диапазоне от 0 до 333 мс, что соответствует углу опережения зажигания от 0 до 60°.

Тактирование блока измерений осуществляется синхросигналом (Bus Clock) частотой 20 МГц с возможностью программного изменения тактовой частоты до 60 МГц.

После настройки устройство сбора информации начинает работу с приходом первого импульса сигнала с датчика оборотов двигателя. Измерения проводятся для каждого оборота коленчатого вала двигателя непрерывно в реальном масштабе времени, результаты измерений заносятся в SDRAM. Одно измерение представляет собой пакет длиной в 12 байт:

- 1 байт – маркер конца цепочки измерений (последнее измерение помечается как 0xffH);
- 2, 3, 4 байта – значение частоты вращения вала двигателя;
- 5, 6 байт – значение, соответствующее относительному количеству воздуха, поступившему в двигатель за такт;
- 7, 8 байт – значение, соответствующее длительности импульса впрыска топлива;
- 9, 10, 11 байт – угол опережения зажигания относительно датчика начала отчета;
- 12 байт – текущий режим работы ДВС.

Длительность одного цикла измерений для двигателя, работающего на средних оборотах, может составлять несколько часов в зависимости от объема установленного в системе модуля SDRAM-памяти. Используя программу начальной настройки при подключении к устройству сбора информации персонального компьютера, в любой момент времени пользователь может подать требование о передаче данных в систему обработки. После получения данных устройство сбора информации можно перенастроить на новый цикл измерений.

На рис.2 представлена серия измерений для определения крутящего момента двигателя 5A-FE Toyota Corolla (рабочий объем 1498 см<sup>3</sup>; степень сжатия 9,6; максимальный крутящий момент 131 Н·м при 3200 об/мин; максимальная мощность 94 л.с. при 6000 об/мин [3]). Экспериментальные исследования проводились при разгоне автомобиля (от 2000 до 6200 об/мин) на ровном участке дороги с асфальтовым покрытием на второй передаче с максимальной нагрузкой.

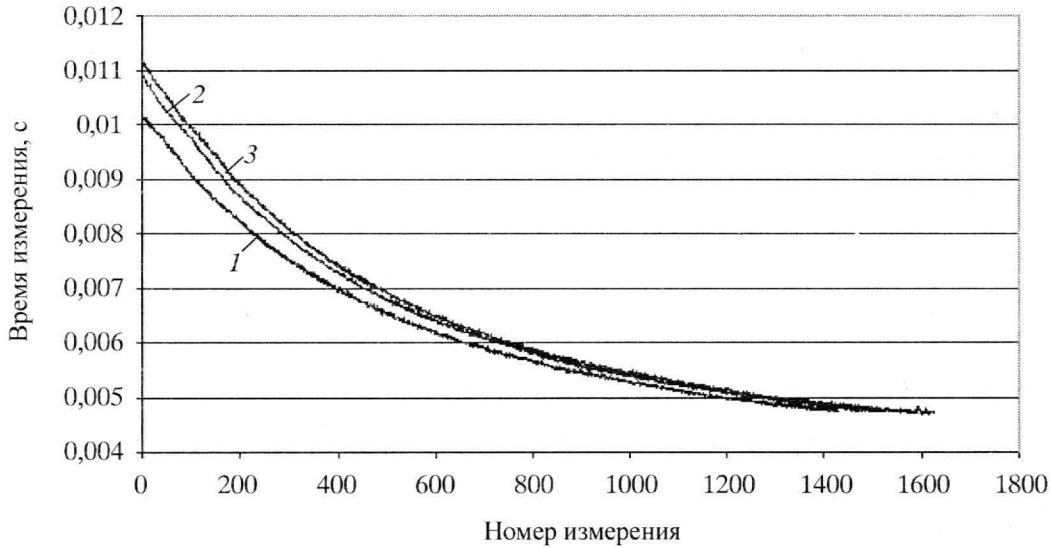


Рис.2. Исходные данные для определения крутящего момента двигателя:  
1 – начало измерений с 1800 об/мин; 2 – с 1830 об/мин; 3 – с 1800 об/мин

Исходные данные для вычисления крутящего момента двигателя – определение длительности периода (время измерения) для каждого оборота коленчатого вала двигателя (номер измерения).

На основе полученных данных по представленной в работе [4] методике системой обработки информации [5] вычисляется ускорение для каждого оборота коленчатого вала двигателя и строятся графики крутящего момента и мощности двигателя (рис.3).

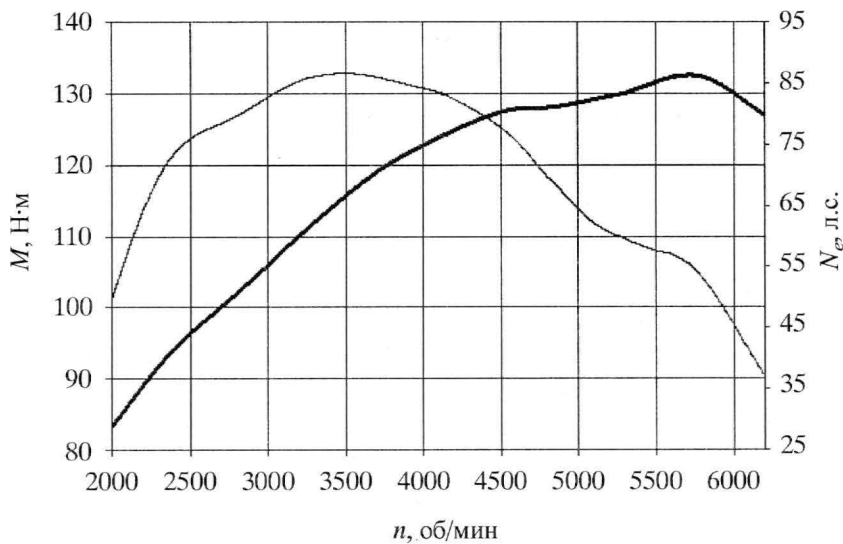


Рис.3. Графики зависимости крутящего момента  $M$  и мощности  $N_e$  от оборотов  $n$  коленчатого вала двигателя: — момент; — мощность

В настоящее время для исследования установок наземного транспорта широко используют так называемые системы диагностирования (общие и локальные) [6]. В случае использования общей системы диагностирования двигатель в целом выступает в качестве объекта исследования, которое проводится при установке транспортного средства (автомобиля, трактора и т. п.) на стационарные тормозные стенды с беговыми барабанами. На подобных стендах осуществляют функциональное исследование двигателя согласно ГОСТ у 23435-79 на установившихся режимах по таким диагностическим параметрам, как эффективная мощность, удельный расход топлива, содержание окиси углерода в отработавших газах и т.п.

При проектировании систем автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания их параметры определяются для установившихся режимов работы двигателя. В то же время в условиях реальной эксплуатации доля неустановившихся режимов для автомобильных двигателей может достигать 90%. На неустановившихся режимах работы двигателя диагностические параметры автомобиля отличает наличие малых изменений информационных составляющих сигналов на фоне сигналов высокого уровня (например, малые относительные изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя при разгоне автомобиля [4]).

Таким образом, разработанный на базе технологии CSoC Triscend A7 измерительный комплекс может применяться для исследования и оптимизации характеристик автомобильных двигателей на неустановившихся режимах работы.

### Литература

1. *Березин В.В., Золотуха Р.Н.* 32-х разрядная реконфигурируемая система на кристалле A7 фирмы TRISCEND // Компоненты и технологии. – СПб., 2003. – № 4. – С. 128–132.
2. The Triscend A7S Configurable System-on-Chip (CSoC) Platform. – <http://www.triscend.com>.
3. JAPANESE MOTOR VEHICLES GUIDE BOOK 1990-'91. – Printed in Japan. – 1991. – Vol. 37. – P. 166, 167.
4. *Бурдинский И.Н.* Исследовательский комплекс для измерения крутящего момента двигателя внутреннего сгорания // Информатика и системы управления. – Благовещенск, 2004. – № 1(7). – С. 130–136.
5. *Бартошук К.В., Бурдинский И.Н., Петрова Е.В.* Программный комплекс для расчета крутящего момента двигателя // Зарегистрирован в Информационно-библиотечном фонде Российской Федерации, инвентарный номер ВНИИЦ № 50200300771, 2003.
6. *Клюев В.В., Пархоменко П.П., Абрамчук В.Е.* Технические средства диагностики: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.

Статья поступила  
25 апреля 2005 г.

*Бурдинский Игорь Николаевич* – старший преподаватель кафедры вычислительной техники Хабаровского государственного технического университета. *Область научных интересов:* применение вычислительной и микропроцессорной техники в системах измерения и обработки данных.

*Миронов Андрей Сергеевич* – аспирант кафедры вычислительной техники Хабаровского государственного технического университета. *Область научных интересов:* цифровая обработка сигналов, проектирование специализированных цифровых систем.



# МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 621.382

## Температурные зависимости коэффициентов захвата глубоких центров в рентгеночувствительных приемниках излучения

*С.В.Булярский*

Ульяновский государственный университет

*А.С.Басаев, В.С.Суханов*

НПК «Технологический центр» МИЭТ

Получены аналитические аппроксимации температурных зависимостей двух глубоких центров, связанных со сложным поведением кислорода в кремнии. Экспоненциальное поведение коэффициентов захвата связано с молекулярным строением центров и сильным электрон-фононным взаимодействием при их перезарядке. Экспериментально показано, что обратные токи рентгеночувствительных приемников определяются процессом генерации с участием в основном одного центра с энергией активации 0,5 эВ, связанного с преципитатами кислорода.

Одним из прогрессивных направлений микросистемной техники стало развитие микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС). Наиболее критичным элементом при разработке МОЭМС является выбор приемника излучения для заданного диапазона длин волн. В НПК «Технологический центр» МИЭТ исследованы, разработаны и изготовлены в опытном производстве различные типы приемников излучения оптического диапазона длин волн от ультрафиолетового до инфракрасного диапазона. Совместно с

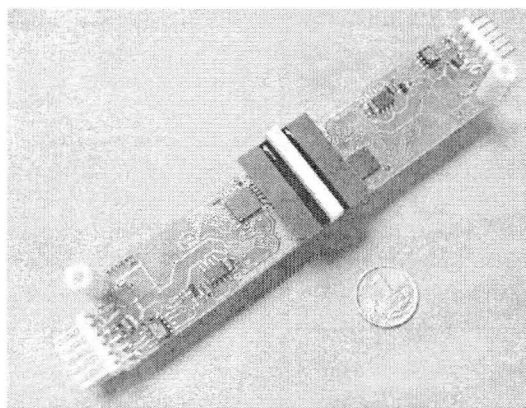


Рис.1. Цифровая линейка детектора рентгеновского излучения

НИИ «Пульсар» (г. Москва) разработана цифровая линейка детектора рентгеновского излучения с общим числом элементов—16 (рис.1). Ее преимуществом является более высокая разрешающая способность (примерно в 3 раза по сравнению с аналогами) и низкое энергопотребление (0,3 Вт на 1 линейку) [1].

Качество рентгеночувствительных приемников излучения зависит от обратных токов. Чем выше обратные токи, тем ниже порог чувствительности рентгеновского излучения. Величина обратного тока в приборах, выполненных на основании высокоомного кремния, определяется содержанием и параметрами глубоких центров [2]. Высококачественный

высокоомный кремний, как правило, не содержит примесей, способных создавать глубокие центры. Исключением является кислород, от которого практически невозможно избавиться [3]. Он создает целый ансамбль дефектов, способных образовывать глубокие центры рекомбинации [4]. Сам кислород создает глубокие термодоноры и преципитаты, которые образуют центры рекомбинации [5]. Отмеченные дефекты относятся к дефектам молекулярного типа. При изменении зарядового состояния таких центров в процессе рекомбинации большую роль играет электрон-фононное взаимодействие, которое приводит к сильным температурным зависимостям коэффициентов захвата при температурах выше 0 °С. Такое поведение данных рекомбинационных параметров должно оказывать значительное влияние на обратные токи и их температурные зависимости, что и является предметом исследования в настоящей работе.

Для исследования температурных зависимостей коэффициентов захвата используется метод преобразования прямых ВАХ  $p$ – $n$ -переходов, получивший название рекомбинационной спектроскопии [6–8].

**Дифференциальные параметры ВАХ.** Токи начального участка  $p$ – $n$ -перехода, как правило, связаны с рекомбинацией в области пространственного заряда (ОПЗ). Этот механизм, названный по имени авторов, впервые его описавших, известен как механизм Шокли–Нойса–Саа [2]. Основным механизмом переноса носителей через переход в данной модели является рекомбинация через глубокие центры в нем. Скорость рекомбинации определяется числом электронно-дырочных пар, исчезающих в единицу объема в результате рекомбинации. Выражение для ВАХ данного участка получено в работах [2, 6–8]:

$$I_r(U) = qSw(U) \frac{c_n c_p n_i^2 N_t (e^{qU/kT} - 1)}{2n_i \sqrt{c_n c_p} e^{qU/2kT} + c_n n_1 + c_p p_1} \frac{2kT}{q(V_d - U)}, \quad (1)$$

где  $w(U)$  – ширина области пространственного заряда;  $c_n$ ,  $c_p$  – коэффициенты захвата электронов и дырок;  $n_i$  – концентрация собственных носителей заряда;  $N_t$  – концентрация глубоких центров;  $V_d$  – диффузионный потенциал перехода;  $S$  – площадь перехода.

Для проведения анализа ВАХ введем новую физическую величину – приведенную скорость рекомбинации  $R_{пр}$ , которая определяется формулой [2]

$$R_{пр}(U) = \frac{I_r(U)}{qSw(U) n_i \left[ \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) - 1 \right]} \frac{q(V_d - U)}{2kT}. \quad (2)$$

Если сопоставить формулу (2) с часто встречающимся выражением для ВАХ

$$I_r(U) = \frac{qSw(U) n_i}{\tau} \left[ \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) - 1 \right],$$

то станет ясным физический смысл  $R_{пр}$  – это величина, обратная времени жизни, определяющая число попыток рекомбинации через данный центр в единицу времени.

Дальнейший анализ, связанный с приведенной скоростью рекомбинации, справедлив, если рекомбинационный ток больше диффузионного. Из (1) и (2) вытекает связь  $R_{пр}$  с параметрами глубоких центров:

$$R_{пр}(U) = \sum_k R_{прk} = \sum_m \frac{c_{nm} c_{pm} n_i N_{tm} \left[ \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) + 1 \right]}{2n_i \sqrt{c_{nm} c_{pm}} \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) + n_{1m} c_{nm} + p_{1m} c_{pm}}. \quad (3)$$

В (3) суммирование происходит по всем рекомбинационным центрам, находящимся в ОПЗ прибора. Легко видеть, что данная величина для каждого рекомбинационного уровня достигает насыщения, которое определяется коэффициентами захвата и концентрацией центров рекомбинации:

$$R_{\text{пр.нас}} = 0,5N_t\sqrt{c_n c_p}. \quad (4)$$

На практике удобно обрабатывать не саму величину приведенной скорости рекомбинации, а ее дифференциальное преобразование:

$$\gamma = \left(\frac{\partial R_{\text{пр}}}{\partial U}\right) \frac{2kT}{q} \frac{1}{R_{\text{пр}}}, \quad (5)$$

где  $R_{\text{пр}}$  определяется выражением (3). Тогда

$$\gamma = \frac{1}{R_{\text{пр}}} \sum_m \frac{R_{\text{пр}m}}{B_m \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) + 1}, \quad \text{где } B_m = \frac{2n_i\sqrt{c_{nm}c_{pm}}}{c_{nm}n_{1m} + c_{pm}p_{1m}}. \quad (6)$$

Видно, что функция (6) имеет максимумы либо другие особенности при наложении процессов от нескольких центров рекомбинации, причем каждая особенность соответствует  $m$ -му глубокому центру. Осуществляя операцию поиска экстремума, находим значения напряжения  $U_{0m}$ , при котором функция (6) имеет максимум, откуда, полагая, что уровень глубокого центра лежит выше середины запрещенной зоны (т.е.  $c_{pm}p_{1m} \ll c_{nm}n_{1m}$ ), получаем связь положения максимума с энергией активации уровня и отношением коэффициентов захвата:

$$E_{tm} = \frac{E_g - qU_{0m}}{2} + \delta_m, \quad (7)$$

где  $\delta_m = \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{1}{4} \frac{c_n N_c}{c_p N_v}\right)$  – систематическая ошибка, которая может быть допущена, когда

неизвестно значение отношения коэффициентов захвата. Так, например, при  $T = 300$  К в случае  $c_{nm}/c_{pm} = 10^2$  ошибка  $\delta_m \approx 0,06$  эВ.

Таким образом, вычисление коэффициентов захвата сводится к следующей последовательности действий. Во-первых, определяется концентрация и энергия термической активации глубоких центров из независимых экспериментов, например, методом термостимулированной емкости, которая применительно к рентгеночувствительным приемникам исследовалась в работе [8]. Затем определяем характерные параметры преобразованных ВАХ: насыщение приведенной скорости рекомбинации и напряжение максимума коэффициента  $\gamma$ . Далее, зная энергию активации и концентрацию глубоких центров из емкостных экспериментов, с помощью формул (4) и (7) вычисляются коэффициенты захвата.

Можно использовать и иной способ определения коэффициентов захвата. Для этого моделируется коэффициент  $\gamma$  и подбираются коэффициенты захвата. Вычисления коэффициентов захвата были выполнены двумя способами, в результате чего получено, что в области температур выше 290 К коэффициенты захвата двух рекомбинационных центров могут быть аппроксимированы формулами:

$$c_n = 8,6 \exp\left(-\frac{0,30}{kT}\right), \quad c_p = 1,9 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{0,85}{kT}\right) \text{ при } E_t = 0,50 \text{ эВ};$$

$$c_n = 0,022 \exp\left(-\frac{0,16}{kT}\right), \quad c_p = 10^6 \exp\left(-\frac{0,57}{kT}\right) \text{ при } E_t = 0,45.$$
(8)

Результаты расчета приведены на рис.2. Они показывают, что предположение о сильной температурной зависимости коэффициентов захвата для центров рекомбинации молекулярного типа полностью подтверждается.

**Обратные ВАХ.** Вольт-амперные характеристики при обратном смещении измерялись на той же автоматизированной установке, что и прямые.

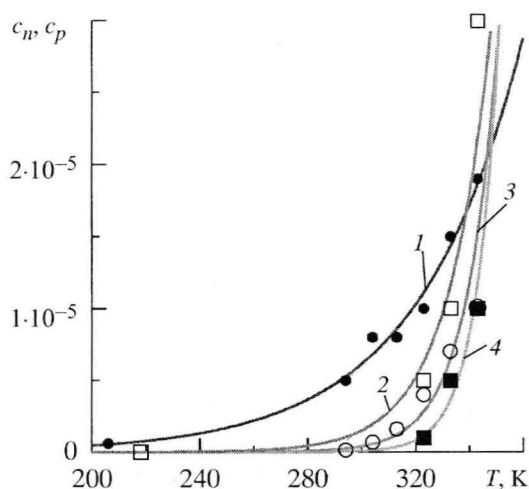


Рис.2. Температурные зависимости коэффициентов захвата глубоких центров с разными энергиями активации (1, 2 —  $c_n$ ; 3, 4 —  $c_p$ ): 1, 3 — 0,45 эВ; 2, 4 — 0,50 эВ; условные обозначения — эксперимент, сплошная линия — расчет

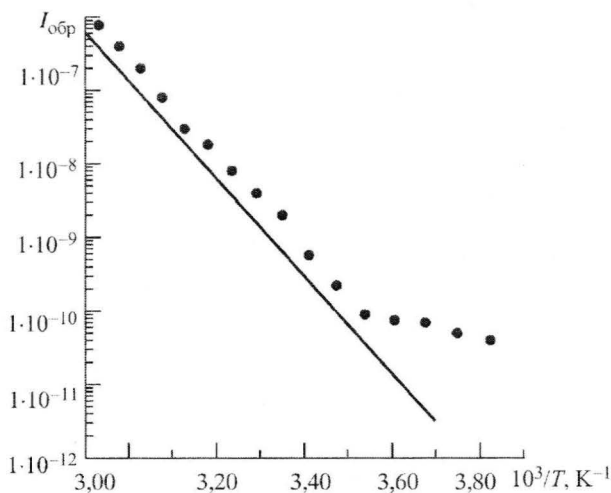


Рис.3. Температурная зависимость обратной ВАХ: точки — эксперимент; сплошная линия — расчет по формуле (9)

На рис.3 приведено сопоставление полученных экспериментальных результатов с результатами моделирования на основе полученных данных из емкостных измерений и измерений прямых ВАХ. Моделирование проводилось в соответствии с моделью, предполагающей, что величина обратного тока определяется процессами генерации в области пространственного заряда [1]:

$$I_{\text{обр}} = qS \int_0^w \frac{e_n^t(x)e_p^t(x)N_t(x)}{e_n^t(x) + e_p^t(x)} dx, \quad (9)$$

где  $e_n^t = r_n c_n N_c \exp(-E_t/kT)$ ,  $e_p^t = r_p c_p N_v \exp(-(E_t - E_v)/kT)$ . Здесь  $r_n$ ,  $r_p$  — факторы вырождения уровня глубокого центра для электронов и дырок, которые изменяются в пределах от 0,5 до 2.

Экспериментальные и расчетные зависимости в целом согласуются, экспериментальная зависимость лежит несколько выше. Это связано с тем, что расчет был сделан без учета влияния электрического поля на коэффициенты захвата. В то же время при сильном электрон-фононном взаимодействии данное влияние может



оказаться весьма значительным, что в рассматриваемом случае представляет предмет отдельного исследования.

Из приведенных результатов следует, что обратный ток определяется в основном одним уровнем, который имеет энергию активации 0,5 эВ и, как показано в [9], связан с преципитацией кислорода.

### Литература

1. <http://www.tcen.ru>
2. Булярский С.В., Грушко Н.С. Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах. – М.: МГУ, 1995. – 399 с.
3. Бабич В.М., Блецкан Н.И., Венгер Е.Ф. Кислород в монокристаллах кремния. – Киев: Интерпрес ЛТД, 1997. – 218 с.
4. Вавилов В.С., Киселев В.Ф., Мукашев Б.Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 216 с.
5. Булярский С.В., Амброзевич А.С., Светухин В.В., Джабраилов Т.А. Влияние кислородных преципитатов на рекомбинационные характеристики кремния // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27, вып. 5. С. 77–81.
6. Булярский С.В., Грушко Н.С., Лакалин А.В. // ФТП. – 1998. – Т. 32. – С. 1193–1196.
7. Булярский С.В., Воробьев М.О., Грушко Н.С., Лакалин А.В. // ФТП. – 1999. – Т. 33. – С. 733–737.
8. Булярский С.В., Грушко Н.С., Лакалин А.В. // Заводская лаборатория. – 1997. – № 7. – С. 25–30.
9. Булярский С.В., Басаев А.С. Термостимулированная спектроскопия глубоких уровней в ренгеночувствительных приемниках излучения // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – № 1. – С. 78–82.

Статья поступила

30 мая 2005 г.

**Булярский Сергей Викторович** – доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной работе Ульяновского государственного университета, заведующий кафедрой оптики и спектроскопии твердого тела. *Область научных интересов:* физические процессы в полупроводниковых приборах с дефектами; исследование генерационно-рекомбинационных процессов в сильных электрических полях; дефекты, комплексообразование, кластеризация и преципитация точечных дефектов в полупроводниках и областях пространственного заряда полупроводниковых приборов.

**Басаев Александр Сергеевич** – заместитель директора государственного научного центра РФ НПК «Технологический центр» МИЭТ. *Область научных интересов:* технология и проектирование СБИС.

**Суханов Владимир Сергеевич** – начальник лаборатории микросистем и микроэлектронной аппаратуры НПК «Технологический центр» МИЭТ. *Область научных интересов:* разработки в области интегральных преобразователей физических величин и систем на их основе.

## **Использование уровня шумов для контроля полупроводниковых изделий при термоциклировании**

*М.И.Горлов, Д.Ю.Смирнов*

**Воронежский государственный технический университет**

*Ю.Е.Сегал*

**ОАО «Воронежский завод полупроводниковых приборов»**

*А.В.Емельянов*

**Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники**

Рассмотрен способ повышения достоверности результатов отбраковки потенциально ненадежных полупроводниковых изделий с использованием термоциклирования. Введен критерий отбраковки.

Все методы отбраковочных испытаний фактически ускоряют проявление внутренних дефектов полупроводниковых изделий (ППИ) и предназначены для «выжигания» ранних отказов, т.е. для отбраковки потенциально ненадежных изделий и повышения надежности партии с оставшимися изделиями [1]. Следовательно, ППИ, выдержавшие отбраковочные испытания, должны иметь более низкую частоту отказов, но это возможно лишь при тщательном измерении электрических параметров и правильной оценке достоверности результатов. В противном случае в процессе эксплуатации происходит отказ изделия, не выявленного на испытаниях. Определяющее значение при этом имеет правильный выбор информативного параметра при отбраковочных испытаниях, так как, например, технологические испытания на стойкость к термоциклированию позволяют отбраковать некачественные ППИ по контролю их электрических параметров, но не позволяют диагностировать на будущее поведение изделий.

В этом случае целесообразно использовать косвенные методы выявления скрытых дефектов при термоциклировании, среди которых большой интерес представляют методы, связанные с анализом шумовых характеристик ППИ [2]. Известно, что наличие дефектов в структуре ППИ неизбежно отражается на ходе процессов, связанных с переносом тока через структуру, что приводит к флуктуациям проводимости и воспринимается во внешней цепи как низкочастотный шум, уровень которого пропорционален скорости деградации структуры [3]. Уже существуют способы отбраковки ППИ с использованием шумовых параметров. Например, в [4] описан способ, состоящий в том, что после измерения шума в эксплуатационном режиме пропускают через прибор импульс тока, в 1,5–5 раз превышающий по амплитуде предельно допустимое значение в установленном режиме, а затем вновь измеряют значение шума. По относительной величине изменения шума определяют потенциальную нестабильность полупроводниковых изделий.

Недостатком способа является подача импульса, превышающего по техническим условиям значение, что может вызвать необратимые изменения в структуре изделий.

В настоящей работе предлагается методика, направленная на повышение достоверности результатов отбраковки потенциально ненадежных ППИ с использованием термоциклирования и рассматриваются способы расширения его функциональных возможностей. Это достигается тем, что проводится измерение низкочастотного (НЧ) шума до термоциклирования и после. Проведение составных испытаний «контроль уровня шума + термоциклирование + контроль уровня шума» позволяет рассматривать поведение каждого изделия, его расположенность к ранним или поздним отказам. Термоциклирование проводится в диапазоне крайних температур, допустимых техническими условиями на изделие. Количество термоциклов не менее десяти.

Для достаточной выборки ППИ из партии одного типа находится коэффициент увеличения значений низкочастотного шума после термоциклирования в сравнении с начальным значением. Выбирается критерий оценки коэффициента увеличения шума. ППИ, у которых коэффициент увеличения шума будет больше установленного критерия, считаются потенциально ненадежными.

В качестве примера проведен эксперимент на 9 транзисторах КТ361Е2 (биполярные  $p-n-p$ -типа с малой мощностью и высокой частотой). Так, реальные ППИ, в частности транзисторы, представляют собой сложную систему, в которой можно выделить область объемного заряда  $p-n$ -переходов, электронейтральные области объема полупроводника, поверхностные области, контакты металл–полупроводник и др. В каждой из этих областей процессы генерации шума обусловлены одним или несколькими доминирующими механизмами, обладающими в пределах данной области в качественном и количественном отношении определенной однородностью. Однако указанные области могут значительно различаться. Следовательно, максимальная полнота прогнозирования отказов возможна при наличии комплекса шумовых параметров, в которых был бы учтен вклад всех упомянутых выше областей. На практике число прогнозирующих параметров стремятся свести к минимуму, а задачу технического прогноза сложной системы можно упростить, если рассматривать его как совокупность отдельных блоков. В случае транзистора частично такой подход можно реализовать, если рассматривать его как систему двух диодов и исследовать их шумовые характеристики отдельно [2].

На первом этапе необходимо выбрать режим постоянного тока для измерения НЧ-шума. Для этого из 9 транзисторов КТ361Е2 были отобраны те, у которых начальный шум  $\bar{U}_{ш}^2$  переходов эмиттер–база и коллектор–база имел наименьшее и наибольшее значения. Для этих двух транзисторов снималась зависимость  $\bar{U}_{ш}^2(I)$  на частоте 1 кГц в диапазоне частот 900–1100 Гц отдельно для каждого перехода (рис.1).

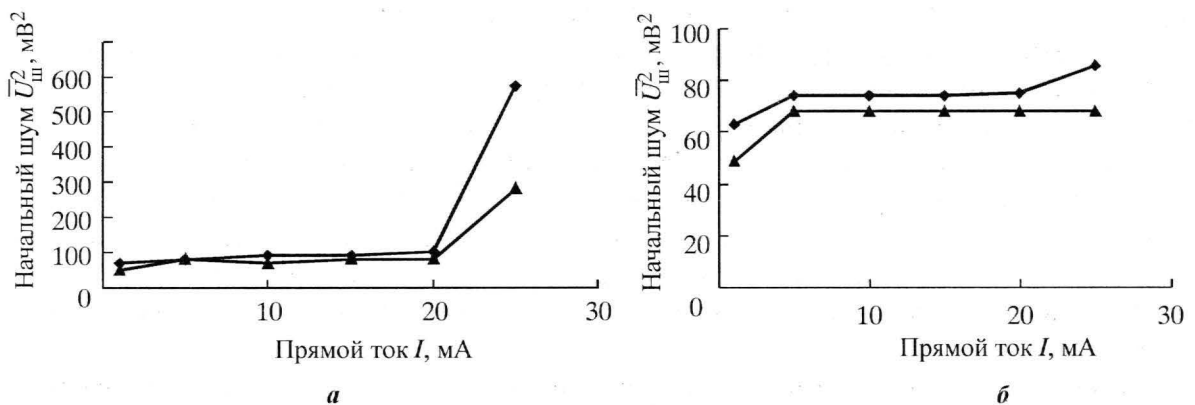


Рис.1. Зависимость  $\bar{U}_{ш}^2(I)$  транзистора КТ361Е2 с максимальными (а) минимальными (б) исходными значениями шума переходов: —▲— коллектор–база; —◆— эмиттер–база

Из рисунков видно, что в данной партии транзисторов КТ361Е2 наиболее стабильными и достоверными будут измерения шума при прямом токе 15 мА.

Далее на этих транзисторах были проведены составные испытания: «контроль уровня НЧ-шума + термоциклирование + контроль уровня НЧ-шума». Измерение шума проводилось при прямом токе 15 мА с помощью установки прямого измерения на частоте 1 кГц до проведения термоциклирования и после 10 термоциклов (0–100 °С

с выдержкой при каждой температуре 30 мин). Ход изменения  $\bar{U}_{ш}^2$  при термоциклировании для наихудшего и наилучшего транзисторов представлен на рис.2.

Сравнивая результаты испытаний при термоциклировании (таблица), можно сделать вывод о надежности транзисторов в партии. Наибольшее значение шума у эмиттерного перехода, и именно он является наиболее чувствительным к процессам термоциклирования. Определив у эмиттерного перехода коэффициент  $K < 1,1$  для надежных транзисторов, можно сказать, что транзисторы №№ 4, 5 будут потенциально ненадежными (см. таблицу); для проверки этого вывода все транзисторы были подвергнуты 200 термоциклам. Транзисторы №№ 4, 5 показали снижение электрического параметра – коэффициента усиления по току ниже нормы, установленной техническими условиями, а значение обратного тока эмиттера у данных транзисторов увеличилось на порядок, в то время как у остальных транзисторов – в 2–4 раза.

#### Значение шумов переходов транзисторов КТ361Е2

Номер транзи- стора	Значения НЧ-шума, мВ <sup>2</sup>				$K = \frac{\overline{U}_{ш.тц}^2}{\overline{U}_{ш.нач}^2}$	
	начальное $\overline{U}_{ш.нач}^2$		после 10 термоциклов $\overline{U}_{ш.тц}^2$			
	К–Б	Э–Б	К–Б	Э–Б	К–Б	Э–Б
1	69	74	70,1	79,5	1,02	1,07
2	71	75	74	80,8	1,04	1,08
3	73	77	74,5	81,7	1,03	1,06
4	77	88	80,5	96,9	1,05	1,10
5	80	92	85,1	103,6	1,06	1,13
6	71	76	72,8	82,2	1,03	1,08
7	68	74	69,1	77,1	1,02	1,04
8	76	85	77,8	90,1	1,02	1,06
9	74	82	77	87,7	1,04	1,07

Примечание: К–Б – переход коллектор–база; Э–М – переход эмиттер–база

Таким образом, предложенная методика направлена на повышение достоверности результатов отбраковки потенциально ненадежных полупроводниковых изделий с использованием термоциклирования. Выбран режим постоянного тока для измерения шума при испытаниях, введен коэффициент отбраковки на основе шумового параметра, позволяющего делать вывод о потенциальной надежности полупроводникового изделия.

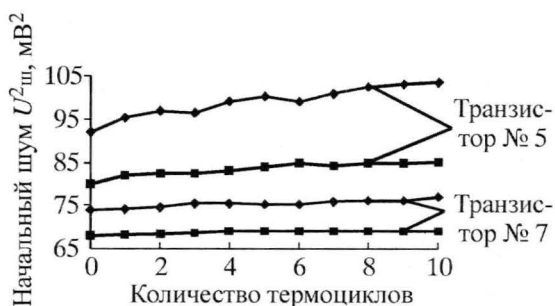


Рис.2. Изменение значения шума для наихудшего и наилучшего транзистора при термоциклировании: —■— переход коллектор–база; —◆— переход эмиттер–база



### Литература

1. Горлов М.И., Ануфриев Л.П., Бордюжа О.Л. Обеспечение и повышение надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем в процессе серийного производства / Под. ред. М.И.Горлова. – Минск: Интеграл, 1997. – 390 с.
2. Карба Л.П., Ульман Н.Н. О выборе шумовых параметров для прогнозирования отказов транзисторов // Электронная техника. Сер. 8. – 1978. – Вып. 7. – С. 14–19.
3. Врачев А.С. Возможности низкочастотного шума как прогнозирующего параметра при оценке качества и надежности изделий электронной техники // Матер. докл. межд. науч.-техн. сем. «Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах». – М., 1996. – С. 191–197.
4. Авт. свид. СССР №490047. Способ определения потенциально нестабильных полупроводниковых приборов / Денисюк В.А., Копыл Г.Ф. / Опубл. 30.10.75. Бюл. № 40.

Статья поступила  
17 января 2005 г.

**Горлов Митрофан Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры полупроводниковой электроники ВГТУ. *Область научных интересов:* повышение надежности полупроводниковых изделий в процессе серийного производства, влияние воздействия внешних дестабилизирующих факторов на интегральные схемы, диагностические методы повышения качества и надежности полупроводниковых изделий (ППИ).

**Емельянов Антон Викторович** – аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. *Область научных интересов:* повышение надежности полупроводниковых изделий в процессе серийного производства, диагностические методы повышения качества и надежности ППИ.

**Сегал Юрий Ефимович** – кандидат технических наук, председатель совета директоров ОАО «ВЗПП». *Область научных интересов:* повышение надежности полупроводниковых изделий в процессе серийного производства, диагностические методы повышения качества и надежности ППИ.

**Смирнов Дмитрий Юрьевич** – аспирант кафедры полупроводниковой электроники ВГТУ. *Область научных интересов:* диагностические методы повышения качества и надежности полупроводниковых приборов.

### Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

С тематическими указателями статей за 1996 - 2005 гг.  
и с содержанием последних номеров можно ознакомиться  
на нашем сайте:

<http://www.miet.ru/static/je/os.html>

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 658.512.2.011.56

### Увеличение динамического диапазона сигма-дельта АЦП методом тройной выборки внутреннего многоразрядного ЦАП

К.С.Тафинцев

Московский государственный институт электронной техники (технический университет)

Использование многоразрядных ЦАП обратной связи в сигма-дельта модуляторах (СДМ) дает преимущества в виде увеличенного динамического диапазона, возможности использования меньших коэффициентов передискретизации и меньшего потребления энергии всего сигма-дельта АЦП, но требует высокой относительной точности аналоговых элементов ЦАП [1], трудно достижимой в стандартных КМДП-процессах, используемых для изготовления сигма-дельта АЦП.

Неточность аналоговых элементов ведет к нарушению линейности передаточной характеристики ЦАП. Техника динамического согласования элементов (ДСЭ) [2] позволяет уменьшить такие нелинейные искажения. Принцип работы ДСЭ заключается в изменении, согласно определенному алгоритму, на каждом такте работы СДМ порядка выбора элементов, отвечающих за формирование аналоговых значений на выходе ЦАП. Величина интегральной нелинейности передаточной характеристики для каждого значения на выходе ЦАП приобретает случайный, зависимый от времени, характер. Таким образом, энергия нелинейных искажений в виде шума распределяется по всему диапазону частот СДМ [2, 3]. За пределами полосы пропускания СД АЦП шумы подавляются фильтром-дециматором, но часть энергии шума остается в пределах полосы сигнала и ведет к уменьшению отношения сигнала к шуму всего СД АЦП.

Для уменьшения нелинейных искажений и шумов, вносимых внутренним ЦАП, предлагается увеличить частоту дискретизации ЦАП и одновременно уменьшить номиналы элементов в три раза. За счет увеличения числа выборок для одного и того же цифрового значения и использования ДСЭ за один такт работы СДМ выбираются три разных набора элементов ЦАП. После суммирования выборок на интеграторе итоговая аналоговая величина, переданная ЦАП, будет равна среднему от трех выборок. На рис.1 показан каскад СДМ на переключаемых кон-

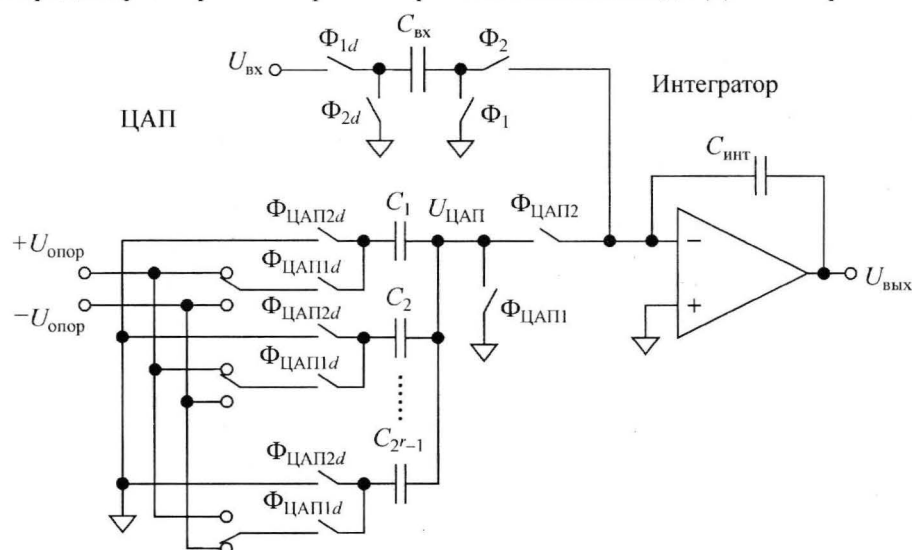


Рис.1. Каскад СДМ с тройной выборкой ( $C_{\text{вх}} = C_{\text{инт}}/a$ , где  $a$  – коэффициент СДМ;  $C_i = C_{\text{вх}}/(3 \cdot 2^i)$ ,  $i = 1, \dots, 2^r - 1$ )

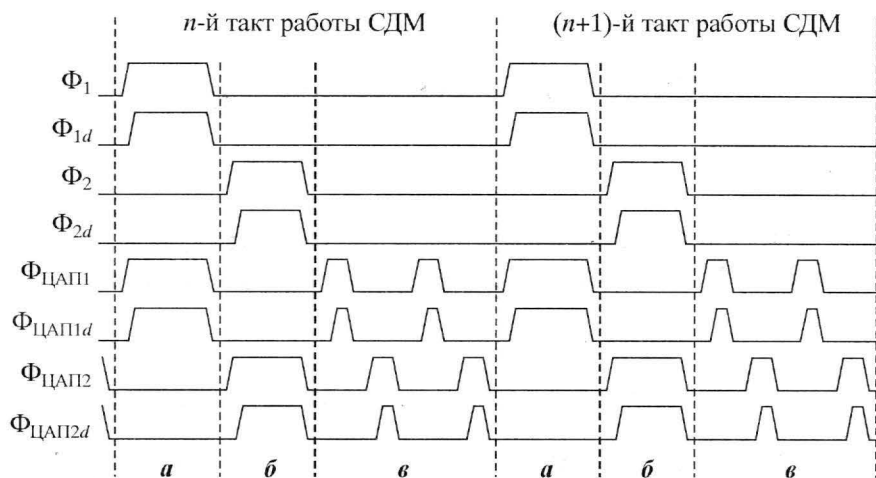


Рис.2. Временные диаграммы тактирования для СДМ с тройной выборкой ЦАП обратной связи: а – зарядка входной емкости и емкости ЦАП; б – этап интегрирования; в – 2 и 3-я выборки ЦАП

денсаторах с реализацией метода тройной выборки, на рис.2 – временная диаграмма тактирования. По сравнению со стандартным методом тактирования (рис.2,а,б), метод тройной выборки отличается наличием этапа 2 и 3-й выборки ЦАП (рис.2,в).

Предложенный способ тактирования был исследован путем моделирования на функциональном уровне СДМ с использованием алгоритма коррекции BiDWA [4] (разрядность внутреннего ЦАП – 5 бит, коэффициент передискретизации – 8). Из результатов моделирования следует, что применение тройной выборки ЦАП позволяет увеличить отношение сигнала к шуму с искажениями более чем на 7–8 дБ, а динамический диапазон, свободный от искажений, – более чем на 9–10 дБ по сравнению со стандартным способом тактирования.

СДМ был промоделирован с использованием разного количества дополнительных выборок ЦАП. Согласно результатам исследования, использование числа выборок ЦАП более трех не вызывает существенного улучшения характеристик СДМ, но серьезно ограничивает быстродействие СДМ, а двойная выборка ЦАП приводит к появлению дополнительных нелинейных искажений. Таким образом, использование тройной выборки ЦАП вместе с ДСЭ позволяет получить дополнительное увеличение динамического диапазона СД ЦАП.

### Литература

1. *Norsworthy S., Schreier R., Temes G.* Delta-Sigma Data Converters Theory, Design, and Simulation. – N.Y.: Wiley Interscience., 1997. – 476 p.
2. *Baird R., Fiez T.* Linearity Enhancement of Multibit  $\Sigma\Delta$  A/D and D/A Converters Using Data Weighted Averaging // IEEE Trans. on Circuits and Systems II. – 1995. – Vol. 42. – P. 753–762.
3. *Nys O., Henderson R.* A 19-Bit Low-Power Multibit Sigma-Delta ADC Based on Data Weighted Averaging // IEEE J. of Solid State Circuits. – Dec. 1998. – Vol. 33. – P. 933–942.
4. A 90-dB SNR 2.5 MHz Output-Rate ADC Using Cascaded Multibit Delta-Sigma Modulation at 8X Oversampling Ratio / *I. Fujimori, L. Longo, A. Hairapetian et al.* // IEEE J. of Solid State Circuits. – Dec. 2000. – Vol. 35. – P. 1820–1828.

Поступило  
23 сентября 2005 г.

**Тафинцев Константин Станиславович** – магистр техники и технологии по направлению «Электроника и микроэлектроника», младший научный сотрудник кафедры телекоммуникационных систем МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая и аналоговая схемотехника, сигма-дельта преобразователи, АЦП, ЦАП, IP-блоки.

# Исследование конструктивной погрешности сопротивления тонкопленочного резистора

В.Г.Спирин

НПП «Темп-Авиа» (г. Арзамас)

При формировании тонкопленочных резисторов (ТПР) в их конструкции предусматривают контактные площадки перекрытия (КПП) резистивного и проводящих элементов [1], которые исключают влияние несовмещения фотошаблона (ФШ) на погрешность сопротивления резистора. Так как КПП увеличивают промежуток между тонкопленочными элементами, то для проектирования микросборки представляет интерес рассмотрение погрешности сопротивления конструкции резистора без КПП. Конструкция такого резистора, полученного при смещении ФШ резистивного слоя относительно проводящего слоя платы, показана на рис.1,а.

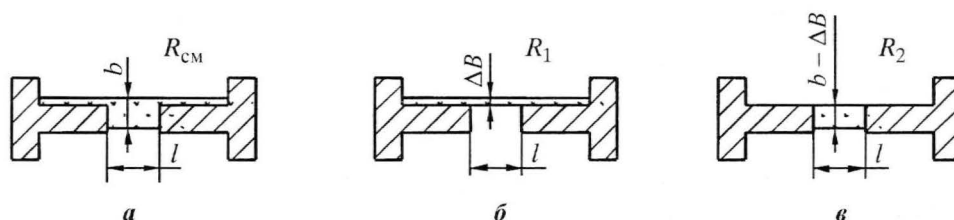


Рис.1. Формирование конструктивной погрешности сопротивления ТПР

Конфигурацию резистора  $R_{cm}$  можно представить в виде двух параллельно соединенных резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ , формы которых приведены на рис.1,б,в. Сопротивления резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  будут определяться выражениями:

$$R_1 = \rho[(l/\Delta B) + 2m]; \quad R_2 = \rho[l/(b - \Delta B)],$$

где  $\Delta B$  – величина смещения резистивного слоя относительно проводящего слоя;  $m$  – число квадратов углового участка резистивного элемента резистора  $R_1$  (на данном участке происходит искривление протекания тока);  $b$  – ширина резистивного элемента.

Определим сопротивление  $R_{cm}$ :

$$R_{cm} = \rho \frac{K_{1\phi} K_{2\phi}}{K_{1\phi} + K_{2\phi}} = \rho \frac{[(l/\Delta B) + 2m] l / (b - \Delta B)}{(l/\Delta B) + 2m + l / (b - \Delta B)} = \rho \frac{l(l + 2m\Delta B)}{lb + 2m\Delta B(b - \Delta B)} = \rho K_{\phi,cm}, \quad (1)$$

где  $K_{\phi,cm}$  – коэффициент формы резистора  $R_{cm}$ .

Преобразуем величину  $K_{\phi,cm}$  (1) путем деления числителя и знаменателя на  $lb$ . Обозначая  $K_{\phi} = l/b$  и  $\delta B = \Delta B/b$ , находим:

$$K_{\phi,cm} = \frac{l/b + 2m\Delta B/b}{1 + 2m\Delta Bb/lb - 2m\Delta B^2/lb} = \frac{K_{\phi} + 2m\delta B}{1 + 2m\delta B/K_{\phi} - 2m\delta B^2/K_{\phi}} = \frac{K_{\phi}(K_{\phi} + 2m\delta B)}{K_{\phi} + 2m\delta B - 2m\delta B^2} = \frac{K_{\phi}}{1 - [2m\delta B^2/(K_{\phi} + 2m\delta B)]}, \quad (2)$$

где  $K_{\phi} = l/b$  – коэффициент формы резистора  $R_{cm}$  при  $\delta B = 0$ , т.е. при отсутствии смещения ФШ.

Найдем относительную погрешность коэффициента формы резистора  $R_{cm}$ :

$$\delta K_{\phi} = \frac{K_{\phi,cm} - K_{\phi}}{K_{\phi}} = \frac{1}{1 - [2m\delta B^2/(K_{\phi} + 2m\delta B)]} - 1. \quad (3)$$



Как видно из выражения (3), погрешность коэффициента формы будет определяться величиной смещения  $\delta B$  и коэффициентом формы несмещенного резистора  $K_\Phi$ . Задаваясь величинами  $\delta B$  и  $K_\Phi$ , можно определить погрешность резистора за счет смещения ФШ. Необходимо отметить, что  $\delta B = f(K_\Phi)$ . При  $K_\Phi \geq 1$ ,  $\delta B = \text{const}$ , так как  $b = \text{const}$ ,  $l = \text{var}$ . При  $K_\Phi < 1$   $\delta B$  уменьшается, так как увеличивается размер  $b$ . На рис.2 приведен график  $\delta K_\Phi = f(K_\Phi)$ , построенный на основании формулы (3), при  $m = 0,461$  [2].

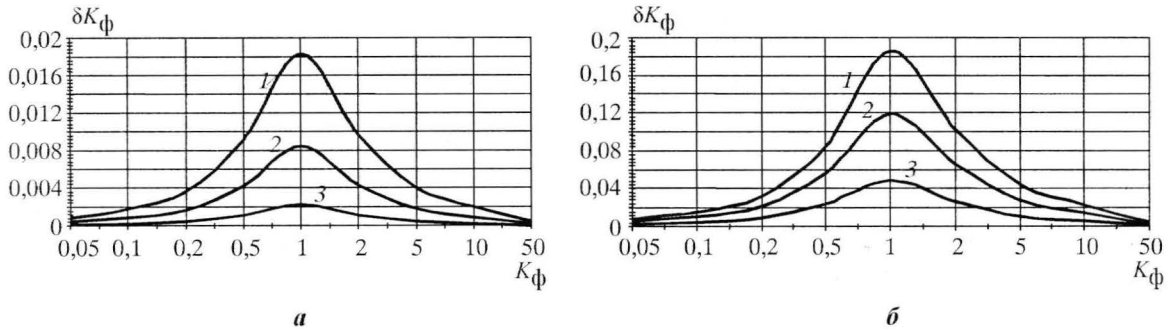


Рис.2. Зависимость относительной погрешности коэффициента формы ТПР от значения коэффициента формы при различных значениях относительного несовмещения фотошаблона: а – 1 –  $\delta B = 0,5$ ; 2 –  $\delta B = 0,10$ ; 3 –  $\delta B = 0,05$ ; б – 1 –  $\delta B = 0,5$ ; 2 –  $\delta B = 0,4$ ; 3 –  $\delta B = 0,25$

Полученные результаты особенно значимы при проектировании ТПР с малыми топологическими размерами. Как известно, смещение фотошаблона при прецизионной фотолитографии достигает 1,5 мкм [3]. Погрешность изготовления фотошаблонов класса С составляет не менее 3,5 мкм [4]. Перечисленные погрешности дают суммарную погрешность  $\Delta B = 5$  мкм, что при ширине ТПР 10 мкм вносит дополнительную погрешность в его сопротивление, соответствующую кривой 1 на рис.2,б.

Для конструкции резистора без контактных площадок перекрытия резистивного элемента и проводника исследована зависимость погрешности сопротивления ТПР от несовмещения ФШ с проводящим слоем подложки при второй фотолитографии. Эта погрешность достигает своего максимального значения при  $K_\Phi = 1$ . В большинстве случаев ( $K_\Phi < 0,1$ ;  $K_\Phi > 10$ ) ТПР можно изготавливать без КПП, что существенно повысит плотность межсоединений. Однако изготовление без КПП ТПР с малыми размерами и для  $0,1 \leq K_\Phi \leq 10$ , даже в случае прецизионного изготовления фотошаблонов и микросборки, приводит к недопустимой погрешности сопротивления ТПР.

### Литература

1. Бондаренко О.Е., Федотов Л.М. Конструктивно-технологические основы проектирования микросборок. – М.: Радио и связь, 1988. – 136 с.
2. Потехин В.А., Спиринов В.Г., Шурыгин Б.Д. Расчет функции числа квадратов углового участка тонкопленочного резистора. Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении // Межвузовский сборник статей по материалам Всероссийской НТК с участием международных специалистов. – Н. Новгород – Арзамас, НГТУ – АФ НГТУ, 2003. – С. 366–369.
3. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
4. ОСТ 4 ГО.073.210-84. Фотошаблоны прецизионные. Общие технические условия.

Поступило  
19 апреля 2005 г.

**Спиринов Владимир Георгиевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО НПП «Темп-Авиа» (г. Арзамас). Область научных интересов: проектирование и технология тонкопленочных микросборок с топологическими размерами 10–50 мкм.

## Метод синтеза особочистых многокомпонентных оксидных порошков

Л.П.Батюня

Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)

Проблемам технологии синтеза новых составов многокомпонентных кристаллизующихся оксидных материалов, в частности особочистых высокодисперсных оксидных порошков с управляемыми параметрами, уделяется значительное внимание, поскольку структура и свойства синтезируемых многокомпонентных материалов зависят от метода синтеза порошков.

Разработка нового метода синтеза оксидных порошков на основе свинецсодержащих ниобатов, например скандата-ниобата свинца (СНС) и его модификаций, заключается в оптимизации технологического процесса получения однородных высокодисперсных порошков стехиометрического состава и повышении сегнето- и электрооптических параметров керамики, сформированной на их основе [1, 2].

В результате исследований разработан новый пероксогодроксополимерный (ПГП) метод синтеза порошков. Для получения порошка СНС состава  $Pb(Sc_{0,5}Nb_{0,5})O_3$  смешанные растворы нитратов свинца и скандия осаждали смесью 25%-ного раствора аммиака и 30%-ного раствора пероксида водорода, взятых в объемном соотношении 1:1, на поверхность пентоксида ниобия при pH 7,5–10,0; образующийся гидроксополимер термически обрабатывали.

Основная задача при разработке ПГП-метода получения порошков СНС состоит в выборе режима гидролиза с целью получения продукта гидролиза в виде связнодисперсной коллоидной системы.

В настоящей работе определены оптимальные соотношения составляющих ингредиентов, а также соотношение между количествами аммиака и пероксида водорода (в осаждающем растворе) или показателя кислотности (в среде, образующей гидроксополимеры), обеспечивающие получение субмикронных порошков СНС однородного гранулометрического и стехиометрического состава (рис.1).

Понижение pH (менее 7,5) приводит к нарушению стехиометрии состава соединений в связи с неустойчивостью гидроксополимера и расслоения системы. Повышение pH (выше 10,0) также приводит к расслоению связнодисперсной коллоидной системы и выделению гидратированных оксидов металлов, в результате чего ухудшается дисперсный состав продукта. К ухудшению стехиометрического состава приводит также изменение объемного отношения аммиака и пероксида водорода ниже 0,5:1. Увеличение содержания пероксида водорода в растворе (выше 1:1) приводит к повышению температуры реакционной смеси, что обуславливает неполноту связывания ионов свинца.

В результате разработки технологического процесса установлено, что на молекулярную массу полимеров влияют вид катиона, анион соли, pH раствора. Поскольку процесс поликонденсации развива-

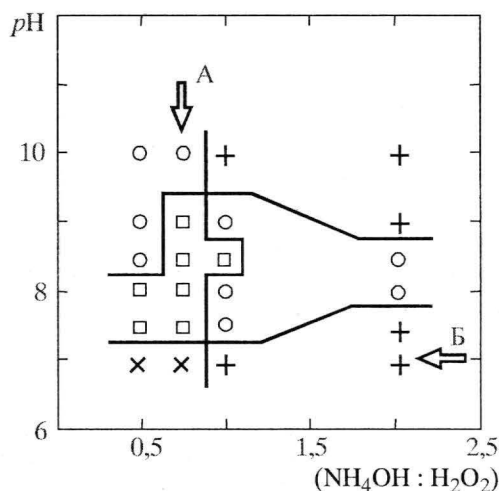


Рис.1. Результаты исследования граничных условий получения порошков с разной дисперсностью: + 8 см²/г; о 9 см²/г; □ 10 см²/г; × 11·10³ см²/г (режим термообработки: 1 ч при температуре 950 °С)

ется во времени, изучен характер изменения  $pH$  гидроксополимеров. Установлено, что отсутствие изменения  $pH$  системы во времени свидетельствует о достижении системой состояния равновесия, т.е. в системе происходят процессы поликонденсации гидросоединений с отщеплением молекул воды и образованием мостикового кислорода.

С помощью химического и рентгенофазового анализов на содержание связанного оксида свинца ( $\alpha = 1 - C_{1(PbO)}/C_{0(PbO)}$ , где  $\alpha$  – степень превращения при образовании твердого раствора СНС;  $C_{0(PbO)}$  – общее содержание  $PbO$ ;  $C_{1(PbO)}$  – содержание «свободного»  $PbO$ ), подтверждающих полноту протекания реакции образования твердого раствора СНС в порошках (рис.2), определены следующие оптимальные условия термообработки гидроксополимера СНС: сушка при температуре 60–70 °С в течение 2 ч и термическая обработка в интервале от 750 до 950 °С в течение 1–3 ч, позволяющие получить порошок с дисперсностью  $1 \cdot 10^4$  см<sup>2</sup>/г.

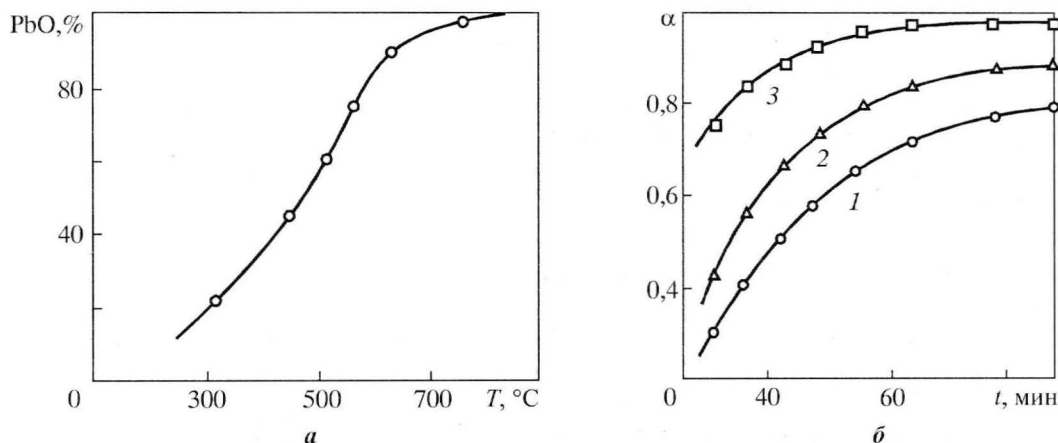


Рис.2. Зависимость содержания связанного оксида свинца от температуры (а) и времени (б) термообработки порошков: 1 – 560 °С; 2 – 660 °С; 3 – 950 °С

Исследование фазового состава порошков, полученных твердофазным синтезом и ППП методом, показало преимущество ППП-синтеза порошков: порошки имеют структуру типа перовскита и количество пироклорной фазы не превышает 4–5 вес.%.

Полученная электрооптическая сегнетокерамика (ЭОСК) на основе порошков СНС, синтезированных пероксигидроксополимерным методом, характеризуется следующими параметрами: светопропускание при толщине пластин 300 мкм и длине волны 0,63 мкм составляет 58–62%, диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{max}$  при температуре фазового перехода составляет 16000–50000, прямоугольность петли диэлектрического гистерезиса – 0,87–0,96, коэрцитивная сила 2,0–4,0 кВ/см. Удельное объемное сопротивление исследованных образцов сегнетокерамики СНС составляет  $1,2\text{--}2,2 \cdot 10^{11}$  Ом·см.

Таким образом, разработанный ППП-метод синтеза оксидных кристаллизующихся порошков СНС для получения ЭОСК по технологии горячего прессования технологичен и характеризуется высокой технической эффективностью по сравнению с известной обычной керамической технологией.

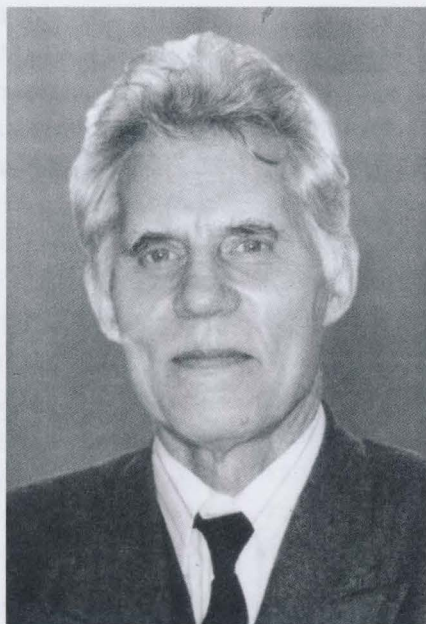
### Литература

1. Dielectric and piezoelectric properties of relaxor  $Pb(Sc_{0.5}Nb_{0.5}O_3)$  thin films / B.J.Kuh, W.K.Choo, K.Brikman et al. // Appl. Phys. Lett. – 2003. – Vol. 83, № 8. – P. 1614–1616.
2. Batjuna L.P., Yolik N.N., Pozarsku B.G. Applikation of Hidroxiopolimer Technologie for obtaining Perovskite-Structure Oxides // Ferroelectrics. – 1988. – Vol. 96. – P. 38–40.

Поступило  
3 октября 2005 г.

**Батюня Людмила Павловна** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры материалов и процессов твердотельной электроники МИЭТ. Область научных интересов: технология многокомпонентных оксидных материалов электронной техники.

# ЮБИЛЕИ



## Валиеву Камилю Ахметовичу – 75 лет

15 января 2005 г. исполняется 75 лет действительному члену РАН Валиеву Камилю Ахметовичу.

Камиль Ахметович Валиев родился 15 января 1931 г. в деревне Верхний Шандер Таканышского (теперь Мамадышского) района Татарской АССР в крестьянской семье. В 1940 г. семья переехала в пос. Горный Саратовской области, где К.А. Валиев в 1949 г. окончил среднюю школу. В том же году он поступил на физико-математический факультет одного из старейших в стране университетов – Казанского государственного университета. К.А. Валиев закончил в 1954 г. курс университета, имея только высшие оценки в зачетной книжке.

Кандидатскую диссертацию К.А. Валиев посвятил теории ядерного магнитного резонанса на ядрах парамагнитных атомов (1958). После окончания в 1957 г.

аспирантуры КГУ он переходит на преподавательскую работу в Казанский государственный педагогический институт (КГПИ). За время работы в институте (1957–1964 гг.) сначала в качестве старшего преподавателя, доцента, а затем заведующего кафедрой физики КГПИ К.А. Валиевым были прочитаны практически все разделы курса общей и теоретической физики.

Результаты исследований К.А. Валиева в области теории магниторезонансной и оптической спектроскопии жидких тел составили материал его докторской диссертации, успешно защищенной им в ноябре 1963 г.

За совокупность фундаментальных теоретических работ в области электронного парамагнитного резонанса К.А. Валиев был позднее награжден международ-



ной премией им. Е.К. Завойского (1997). С защитой докторской диссертации К.А. Валиев приобрел известность в широких научных кругах как талантливый физик-теоретик, способный с успехом решать самые разнообразные задачи.

Летом 1964 г. К.А. Валиев был приглашен в Научный центр микроэлектроники (г. Зеленоград) для работы над проблемой создания микроэлектронной промышленности в СССР.

В январе 1965 г. К.А. Валиев был назначен директором НИИ молекулярной электроники Научного центра. Физик-теоретик оказался в гуще кипучей деятельности по строительству, подбору и подготовке научных и производственных кадров, решению первых задач по разработке базовой микроэлектронной технологии. Деятельность К.А. Валиева по созданию микроэлектронной промышленности в СССР была отмечена в 1974 г. Ленинской премией, а в 1976 г. за организацию микроэлектронного производства в Баку – Государственной премией Азербайджана.

К.А.Валиев принял активное участие в разработке структуры Московского института электронной техники (МИЭТ) и создал кафедру интегральных полупроводниковых схем, которую возглавлял более 10 лет. В эти годы наиболее ярко проявился талант К.А.Валиева как педагога. Им была разработана методология подготовки специалиста нового типа, которая предусматривает сочетание фундаментального образования по физике и математике с овладением конкретными знаниями в области практической микроэлектроники. К.А.Валиевым были разработаны и читались студентам учебные курсы по физике твердого тела и полупроводников, а также по ряду специальных дисциплин.

В 1972 г. К.А. Валиев избран членом-корреспондентом АН СССР (Отделение общей физики и астрономии).

В 1977 г. К.А. Валиев перешел работать в Академию наук СССР – сначала в Институт космических исследований, а затем в ФИАН, куда он был приглашен академиком А.М. Прохоровым для организации лаборатории микроэлектроники.

В 1988 г. было принято решение об организации на базе Отдела микроэлектроники ИОФАНа Физико-технологического института АН СССР (ФТИАН), директором которого стал К.А.Валиев. С этого же года он – главный редактор журнала «Микроэлектроника».

В этот же период на факультете физической и квантовой электроники МФТИ К.А. Валиевым была организована кафедра физико-технологических проблем микроэлектроники, которая продолжает работать и в настоящее время.

Работы К.А. Валиева в области микроэлектроники составили содержание его монографий: Цифровые интегральные схемы на МДП-транзисторах (совместно с М.А. Королевым и А.Н. Кармазинским). – М.: Сов. радио, 1971; Полупроводниковые интегральные схемы памяти на биполярных транзисторных структурах (совместно с А.А. Орликовским). – М.: Сов. радио, 1979; Применение контакта металл – полупроводник в электронике (совместно с Ю.И. Пашинцевым, Г.В. Петровым). – М.: Радио и связь, 1981; Микроэлектроника: Достижения и пути развития. – М.: Наука, 1986; Физика субмикронной литографии. – М.: Наука, 1990; The Physics of Submicron Lithography. – N.Y.: Plenum Press, 1992.

В 1998 г. К.А. Валиев обратился к новой области исследований – квантовым

компьютерам и квантовым вычислениям, а в более широкой постановке – к квантовой информатике, включающей в себя кроме квантовых компьютеров и вычислений также квантовые связь и метрологию.

По теме квантовых компьютеров и вычислений К.А.Валиев (совместно с А.А.Кокиным) написал первую отечественную монографию по квантовым компьютерам «Квантовые компьютеры: надежды и реальность», которая выдержала два издания.

В 2001 г. в МГУ создана возглавляемая К.А.Валиевым кафедра квантовой информатики на факультете вычислительной математики и кибернетики.

Академик К.А.Валиев в настоящее время активно работает в области микро- и наноэлектроники и в области квантовой информатики. В 2005 г. в журнале «Успехи физических наук» (Т.175, №1) опубликован обзор К.А.Валиева «Квантовые компьютеры и квантовые вычисления».

Научно-педагогическая школа К.А. Валиева вырастила немало выдающихся ученых, среди которых члены-корреспонденты РАН, доктора наук и профессора, руководители и ведущие специалисты предприятий отечественной электроники.

Научная деятельность К.А. Валиева в последние годы высоко оценена. Он награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» IV степени, ему присуждены премия Правительства РФ за разработку и создание новой техники, премия РАН имени С.А.Лебедева за цикл работ «Научные и технологические основы элементной базы вычислительной техники».

Главное в творчестве Камиля Ахметовича – это умение видеть и воспринимать новое, широта кругозора, разносторонняя и глубокая оценка явлений, беспримерная увлеченность наукой, неиссякаемая работоспособность и упорство в достижении поставленных целей. Многие из его работ по праву можно отнести к высшим достижениям современной физики.

*Редколлегия журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника» поздравляет Камиля Ахметовича с юбилеем и 50-летием научной, научно-организационной и педагогической деятельности, желает ему крепкого здоровья и дальнейших трудовых успехов на благо российской науки и высшей школы.*

# CONTENTS

The 22-nd Central Research Test Institute of the Ministry of Defence of the Russian Federation marks by celebrating the 50-th anniversary of its founding .....	4
<i>V.A.Telets, J.S.Negina, A.A.Orlov</i> Tendency, Basis and Development Conditions of Microsystems Special Application .....	9
<b>Electronic engineering materials</b>	
<i>V.V.Bardushkin, M.M.Serov, V.B.Yakovlev, I.I.Bulakh</i> Structure of Cross-Section and Heterogeneity of Elastic Properties of Polycrystalline Aluminum Tape.....	21
<i>L.P.Batunya</i> Control of Oxide Multi-Component Material Properties Using Modifying Elements .....	28
<i>V.V.Solovey, Yu.M.Litvinov</i> Diagnostics of Submicron Subsurface Damages in Silicon Wafers after Double-Sided Chemical-Mechanical Polishing.....	33
<b>Microelectronics technology</b>	
<i>A.M.Grushevsky, S.N.Semenin, P.A.Zhukov, V.V.Karvasarny</i> Technology of Sensitive Mounting on Polyimide Boards.....	36
<i>E.A.Senokosov, A.L.Makarevich, V.V.Sorochan</i> Investigation of switching mechanism in nCdTe:In Layers.....	41
<i>V.A.Barchotkin, Yu.P.Rainova, A.I.Terentev, A.Y.Rainov</i> Temperature Regime Control Algorithm in Rapid Thermal Processes.....	46
<i>T.Y.Kroupkina</i> Virtual Manufacturing: Structure and Main Elements.....	52
<b>Microelectronics and semiconductor devices</b>	
<i>Yu.A.Chaplygin, A.I.Galushkov, A.A.Semenov, D.A.Usanov</i> Dinistor Controlled by Magnetic Field.....	56
<b>Circuit engineering and design</b>	
<i>R.A.Solovyev, A.L.Glebov, S.V.Gavrilov</i> Delay Noise Analysis in VLSI Using Logic Correlations .....	61
<b>Microprocessor systems</b>	
<i>G.E.Shiro, S.P.Romanov</i> Algorithm of Squinted SAR-Image Synthesis at Small Angles ....	69
<i>V.Y.Kochetkov, A.L.Pereverzev, Y.V.Savchenko</i> Prime Processing of Pulse Time Modulated Signal Containing Combined Noise.....	75
<i>I.N.Burdinskiy, A.S.Mironov</i> CSo Technology Applied to Automobile Internal Combustion Engine Working Conditions Investigation.....	79
<b>Measurement methods and technology</b>	
<i>S.V.Bulyarsky, A.S.Basaev, V.S.Sukhanov</i> Thermal Dependencies of Deep Centers Trap Coefficients for X-Ray Sensitive Radiation Receivers .....	84
<i>M.I.Gorlov, A.V.Yemelyanov, J.E.Segal, D.J.Smirnov</i> Use of Noise Level for Control of Semiconductor Products During Temperature Cycling.....	89
<b>Brief reports</b>	
<i>K.S.Tafintsev</i> Dynamic Range Enhancement of Delta-Sigma DAC Using Triple Sampling for Internal Flash DAC.....	93
<i>V.G.Spirin</i> Study of Thin-Film Resistor Structural Error .....	95
<i>L.P.Batunya</i> Synthesis Method of Especially Pure Multi-Component Oxide Powders .....	97
<b>Anniversaries</b>	
Valiev K.A. is 75 years old.....	99

## ABSTRACTS

**The 22-nd Central Research Test Institute of the Ministry of Defence of the Russian Federation marks by celebrating the 50-th anniversary of its founding.**

### **Tendency, Basis and Development Conditions of Microsystems Special Application**

*V.A.Telets, J.S.Negina, A.A.Orlov*

Analysis results of Microsystems have been introduced and its typical parts list development process trends have been discussed, which are of primary importance and the basis of the further microminiaturization of special purpose technique.

## **ELECTRONIC ENGINEERING MATERIALS**

### **Structure of Cross-Section and Heterogeneity of Elastic Properties of Polycrystalline Aluminum Tape**

*V.V.Bardushkin, M.M.Serov, V.B.Yakovlev, I.I.Bulakh*

The study on the change of the grain form and crystallographic texture and the influence of these factors on the structure-sensitive properties has been carried out during melt quenching for production of thin aluminum tapes. The crystallographic texture has been determined by the X-ray diffraction data. The form of grains has been investigated and analyzed using the "Video-Test" computer system. The calculations of the properties have been carried out for elastic characteristics by the method of a generalized singular approximation of the random fields theory. Presence of the tape three-layer structure has been shown. The distribution of the effective elastic modules on the tape thickness has been found. The local stress-strain conditions of crystallites have been analyzed under the external mechanical influences.

### **Control of Oxide Multi-Component Material Properties Using Modifying Elements**

*L.P.Batunya*

The influence of some modifying additives on the properties of the electro-optic segneto-ceramics of the plumbum scandate-niobate composition has been investigated.

### **Diagnostics of Submicron Subsurface Damages in Silicon Wafers after Double-Sided Chemical-Mechanical Polishing**

*V.V.Solovey, Yu.M.Litvinov*

The maximum depth of the substrate damages in silicon wafers after the first and second stages of double-sided polishing has been estimated using the circular symmetric deflection method. It has been shown that OISF density after different stages of chemical-mechanical polishing had correlation with the estimation of the maximum depth of the subsurface damages revealed by the circular symmetric deflection method. The non-uniformity of the OISF distribution on the wafer surface has been explained by peculiarities of chemical-mechanical polishing.

## **MICROELECTRONICS TECHNOLOGY**

### **Technology of Sensitive Mounting on Polyimide Boards**

*A.M.Grushevsky, S.N.Semenin, P.A.Zhukov, V.V.Karvasarny*

The optimal conditions of sensitive mounting of the multi-pin chips on the polyimide boards have been substantiated. The experiments have shown that the preferable method is the one-sided contact welding by a binary electrode that ensures high durability stability of the contact junction. The estimation of temperature during microcontacting has been made by rating, and the temperature is the determining factor of the contact junction durability. The experimental results show an adequacy of the obtained rated model.



## **Investigation of switching mechanism in nCdTe:In Layers**

*E.A.Senokosov, A.L.Makarevich, V.V.Sorochan*

The investigation results of switching of S-type in the nCdTe:In thick polycrystalline layers have been presented. They specify that the basis of electric lability of layers is the thermo-electron breakdown mechanism. The dependence of the switching threshold parameters on the light intensities may be used for creation on the basis of the nCdTe:In layers of the electrical switches to be controlled by infrared light.

## **Temperature Regime Control Algorithm in Rapid Thermal Processes**

*V.A.Barchotkin, Yu.P.Rainova, A.I.Terentev, A.Y.Rainov*

The algorithm of the substrate temperature gradient minimization in a RTR reactor by regulation of the gas dynamic conditions has been presented. The base cell of the control system is the gas environment optical density laser meter; the control circuit (scheme) is constructed by the deviation of the interference pattern shape on the holographic interferogram of the control phase object from a standard distribution. The problem has been solved for the conditions, when the process proceeds in vicinity of the temperature regime prescribed values.

## **Virtual Manufacturing: Structure and Main Elements**

*T.Y.Kroupkina*

The approaches to construction of "virtual manufacturing" concept have been considered. The structure of "virtual manufacturing" has been proposed, and the main elements of a simulation system for the integrated circuit manufacturing process on a physical level have been distinguished.

## **MICROELECTRONICS AND SEMICONDUCTOR DEVICES**

### **Dinistor Controlled by Magnetic Field**

*Yu.A.Chaplygin, A.I.Galushkov, A.A.Semenov, D.A.Usanov*

The investigation results of the magnetostatic field influence on operation regimes of the symmetrical transistor equivalent with a magnetosensitive element in the feedback circuit have been presented. It has been shown, that it is possible to realize the dinistor with differential resistance, controlled by the magnetic field value.

## **CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN**

### **Delay Noise Analysis in VLSI Using Logic Correlations**

*R.A.Solovyev, A.L. Glebov, S.V.Gavrilov*

The method for solving the problem of the delay noise analysis for entire path, simultaneously taking into account the delay data in each functional unit of the circuit has been proposed. The method basis is the well-known branch and bound algorithm with some heuristic approaches. The experimental data presented demonstrate the proposed method high effectiveness.

## **MICROPROCESSOR SYSTEMS**

### **Algorithm of Squinted SAR-Image Synthesis at Small Angles**

*G.E.Shiro, S.P.Romanov*

The algorithm of the squinted SAR-image synthesis based on the method of direct convolution of trajectory signal with several (up to 5) matched filter impulse responses has been offered. The algorithm permits to obtain SAR-images at such small anterior-lateral viewing angles as 50 and less. The algorithm hardware realization estimate has been also presented.

### **Prime Processing of Pulse Time Modulated Signal Containing Combined Noise**

*V.Y.Kochetkov, A.L.Pereverzev, Y.V.Savchenko*

The development results of an approach of the pulse-time modulated command signal detection and decoded commands filtration in conditions of the combined noise influence have been presented. The features of specific realization on an example of the pilot-free aircraft remote control system have been considered.

## **CSoC Technology Applied to Automobile Internal Combustion Engine Working Conditions Investigation**

*I.N.Burdinskiy, A.S.Mironov*

Using the CSoC technology a measuring complex for the automobile Internal Combustion Engine (ICE) working conditions has been developed. It makes possible to record with high accuracy the big volumes of information of the engine diagnostic parameters.

## **MEASUREMENT METHODS AND TECHNOLOGY**

### **Thermal Dependencies of Deep Centers Trap Coefficients for X-Ray Sensitive Radiation Receivers**

*S.V.Bulyarsky, A.S.Basaev, V.S.Sukharov*

The thermal dependencies analytical approximations for two deep centers connected with the complex oxygen behavior in silicon have been obtained. The exponential behavior of the trap coefficients is connected with the molecular structure of the centers and with the strong electron-photon interaction during its recharging. It has been experimentally shown that the back currents of the X-ray sensitive receivers are determined mainly by the one center generation process. This center has the activation energy of 0.5 eV and is connected with the oxygen precipitates.

### **Use of Noise Level for Control of Semiconductor Products During Temperature Cycling**

*M.I.Gorlov, A.V.Yemelyanov, J.E.Segal, D.J.Smirnov*

The method of the reliability improvement of results of potentially unreliable semiconductor products using the thermal tests has been offered. The rejection criterion has been introduced.

## **BRIEF REPORTS**

### **Comparison of Statistical and Interval Methods for Solving Task of Measurement Device Graduation**

*V.B.Nikulin, N.V.Inozemtsev*

The main theoretical bases of the statistical method, which are significant for solving the task of graduation of measurement devices, have been considered. The analysis of these statements has been carried out and the conclusion on the priority of the interval method compared to the statistical one in solving the given applied task has been made.

### **Dynamic Range Enhancement of Delta-Sigma DAC Using Triple Sampling for Internal Flash DAC**

*K.S.Tafintsev*

A new method of internal flash DAC sampling has been proposed. Multiplying the DAC sampling rate by three reduces the internal flash DAC component nonlinearities influence on the dynamic range of delta-sigma DAC.

### **Study of Thin-Film Resistor Structural Error**

*V.G.Spirin*

A relationship between the thin-film resistance error and the mask misalignment with the substrate conductive layer at the second photolithographic stage for a thin-film resistor design, in which the resistance element doesn't overlap the conductor pads, has been studied. The error value is at maximum, when the resistor aspect ratio is equal to 1.0.

### **Synthesis Method of Especially Pure Multi-Component Oxide Powders**

*L.P.Batunya*

A new method of peroxide hydroxopolymer synthesis of especially pure multi-component oxide powders has been developed. The optimal conditions of the hydroxopolymer production in the form of the connected-dispersion colloid system, as well as the thermal treatment regimes in producing the high-dispersion powders of the stoichiometric composition  $\text{Pb}(\text{Sc}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$ , have been determined.

## Тематический указатель статей, опубликованных в 2005 году

МИЭТ – 40 лет

*Бархоткин В.А., Рыгалин Б.Н., Пустовит В.Ю.* Научные исследования в МИЭТ. № 4–5, с. 15.  
*Беспалов В.А.* Инновационная структура МИЭТ. № 4–5, с. 22.  
*Поспелов А.С., Акуленок М.В., Леонтьев В.Б.* Развитие системы подготовки специалистов в МИЭТ (2001–2005). № 4–5, с. 11.  
*Чаплыгин Ю.А.* МИЭТ – 40. № 4–5, с. 6.

### Фундаментальные исследования

*Горбачевич А.А., Егоркин В.И., Канаев В.В., Конаев Ю.В., Мороча А.К., Шмелев С.С.* Полупроводниковые гетероструктуры и квантовые приборы на их основе. № 4–5, с. 31.  
*Горбачевич А.А., Жабицкий О.В.* Микроскопическая теория симметричных гетеропереходов. № 2, с. 3.  
*Плис В.И., Попов А.И.* Перестройка спиновой структуры и намагничивание высокомолекулярных магнитных кластеров в сильных магнитных полях. № 4–5, с. 39.  
*Поспелов А.С.* О применении операторов усреднения в задаче сжатия дискретных сигналов. № 2, с. 11.

### Материалы электронной техники

*Апрелов С.А., Гайдуков Г.Н., Герасименко Н.Н., Медетов Н.А.* Фрактальный анализ упорядоченности поверхностных микроструктур. № 2, с. 25.  
*Арендаренко А.А., Голодаева Н.Л., Литвинов Ю.М., Цыпленков И.Н., Хуснетдинов И.А., Бардушкин В.В.* Эффективные упругие характеристики пространственно неоднородных материалов. № 2, с. 19.  
*Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Булах И.И., Серов М.М.* Неоднородность упругих свойств поликристаллических лент алюминия. № 6, с. 21.  
*Батюня Л.П.* Управление свойствами оксидных многокомпонентных материалов с использованием модифицирующих элементов. № 6, с. 28.  
*Боргардт Н.И., Зыков А.В., Кукин В.Н., Максимов С.К.* Электронно-микроскопические методы исследования наноструктурированных и нанофазных материалов. № 4–5, с. 44.  
*Неустроев С.А., Неустроев А.С.* Перестановочная энтропия плотнейших упаковок. № 3, с. 3.  
*Павлов В.Ф.* Глубина и структура повреждений в пластинах GaP, полученных методом многопроволочной резки. № 2 с. 32.  
*Соколов Е.Б., Рыгалин Б.Н., Смирнов В.В., Прокофьева В.К., Найда Г.А.* Кремний и широкозонные нитриды – основа полупроводниковой энергетики. № 4–5, с. 52.  
*Соловей В.В., Литвинов Ю.М.* Диагностика субмикронных приповерхностных повреждений в пластинах кремния после двухстороннего химико-механического полирования. № 6, с. 32.  
*Шерченков А.А.* Гетероструктуры на основе некристаллических полупроводников для приборного применения. № 4–5, с. 58.

### Технология микроэлектроники

*Бархоткин В.А., Райнова Ю.П., Терентьев А.И., Райнов А.Ю.* Алгоритм управления температурным режимом в быстрых термических процессах. № 6, с. 46.

*Грушевский А.М., Семенин С.Н., Жуков П.А., Карвасарный В.В.* Технология прецизионного монтажа на полиимидных платах. № 6, с. 36.

*Крупкина Т.Ю.* Структура и основные элементы системы виртуального производства. № 6, с. 52.

*Найда Г.А., Смирнов В.В.* Технологические закономерности выращивания структур AlN и GaN на сапфире при использовании неорганических донорно-акцепторных комплексов. № 3, с. 7.

*Сенокосов Э.А., Макаревич А.Л., Сорочан В.В.* Исследование механизма переключения в слоях  $n\text{CdTe:In}$ . № 6, с. 41.

*Смирнов В.В.* Влияние разориентации  $R$ -плоскости сапфира на процесс гетероэпитаксиального осаждения нитридов алюминия и галлия. № 1, с. 5.

## Микроэлектроника и полупроводниковые приборы

*Агеев О.А.* Термодинамический анализ твердофазных взаимодействий в контактах Ni/SiC. № 2, с. 42.

*Алексеев Ю.И., Демьяненко А.В.* Расчет импеданса лавинно-пролетного диода в малосигнальном режиме. № 1, с. 25.

*Бобрешов А.М., Хребтов И.В.* Аналитическая модель для субмикронных HEMT-транзисторов с учетом короткоканальных эффектов. № 3, с. 14.

*Булатов А.Н., Неволин В.К.* Полевой эффект в квазиодномерном канале на танталовых пленках. № 2, с. 37.

*Горбацевич А.А., Налбандов Б.Г., Старосельский В.И., Шмелев С.С.* Арсенид-галлиевые интегральные микросхемы для систем телекоммуникаций, радиолокации и измерительной техники. № 4–5, с. 72.

*Григорашвили Ю.Е., Ичкитидзе Л.П., Волик Н.Н., Бухлин А.В., Мингазин В.Т., Полякова Е.В.* Исследование магниторезистивного эффекта в пленках высокотемпературного сверхпроводникового материала системы Bi–Pb–Sr–Ca–Cu–O. № 4–5, с. 87.

*Киргизова А.В., Яненко А.В., Никифоров А.Ю., Григорьев Н.Г.* Методика и результаты экспериментальных исследований сбоеустойчивости КМОП КНС оперативных запоминающих устройств при импульсном ионизирующем воздействии. № 3, с. 29.

*Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Кострицкий С.М.* Оптические волноводы и интегрально оптические устройства на кристаллах ниобата лития. № 4–5, с. 79.

*Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Чаплыгин Ю.А.* Приборно-технологическое моделирование при разработке изделий микроэлектроники и микросистемной техники. № 4–5, с. 64.

*Лугин А.Н., Оземша М.М.* Воздействие давления окружающей среды на электрическое сопротивление тонкопленочных прецизионных резисторов. № 1, с. 19.

*Минаев В.В., Уздовский В.В., Сондаевский Р.В., Уздовский Вл.В.* Исследование спектральных характеристик фотоприемников с барьером Шотки на основе  $p\text{-Si-Au}$ . № 1, с. 12.

*Севастьянов В.П., Кузьмин Н.Г.* Методы повышения надежности жидкокристаллических индикаторов. № 1, с. 29.

*Сергеев В.А.* Аналитическая модель неизотермического распределения плотности мощности в структурах биполярных транзисторов. № 3, с. 22.

*Чаплыгин Ю.А., Галушков А.И., Семёнов А.А., Усанов Д.А.* Магнитоуправляемый динистор. № 6, с. 56.

## Нанотехнология

*Гаврилов С.А., Белов А.Н., Железнякова А.В., Вишник Е.В., Кравченко Д.А.* Электрохимические процессы формирования твердотельных наноструктур. № 4–5, с. 94.

*Булатов А.Н., Неволин В.К., Чаплыгин Ю.А.* Зондовая технология в нанoeлектронике на основе углеродных элементов. № 4–5, с. 98.

*Бархударов А.В., Гаврилов С.А., Голишников А.А., Путря М.Г.* Получение наноразмерных матричных структур в кремнии. № 4–5, с. 102.

*Герасименко Н.Н.* Самоорганизованные имплантированные наноразмерные структуры в полупроводниках. № 4–5, с. 107.



## Схемотехника и проектирование

- Анисимов В.А., Борисов А.Г., Волкова Г.В., Козлитин И.А., Крутоверцев С.А.* Математическое моделирование распространения света в изогнутых цилиндрических волноводах. № 1, с. 35.
- Артемьев С.А.* Разработка конвертора проекта интегральных схем из базиса ПЛИС в базис БМК. № 1, с. 42.
- Дубровин С.А.* Объектные представления в базах данных САПР СБИС. № 3, с. 56.
- Казённов Г.Г.* Интеграция процессов проектирования интегральных схем и систем. № 4–5, с. 130.
- Казённов Г.Г., Миргородский А.Ю.* Метод оценки коэффициента масштабирования с применением интегральных характеристик бинаризованного изображения. № 3, с. 51.
- Ковалев А.В.* Метод проектирования систем–на–кристалле на основе сетевых алгоритмов. № 2, с. 49.
- Лаврентьев М.В., Круглов Ю.В.* Выбор архитектуры многокаскадного сигма-дельта модулятора на основе оценки «просачивающегося» шума квантования и физического шума. № 3, с. 40.
- Семенов М.Ю., Калашиников В.С., Ласточкин О.В.* Применение аппарата модулярной арифметики для построения фильтра с конечной импульсной характеристикой. № 3, с. 46.
- Соловьев Р.А., Глебов А.Л., Гаврилов С.В.* Анализ помех, влияющих на задержку прохождения сигнала в цифровых СБИС, на основе логических ограничений. № 6, с. 61.
- Тафинцев К.С.* Модель для анализа алгоритмов коррекции ЦАП обратной связи в многоразрядных сигма-дельта модуляторах. № 3, с. 33.
- Щемелин В.М., Хамидулин Р.Х.* Методологические аспекты автоматизированного синтеза топологии СБИС. № 4–5, с. 137.
- Энкович А.В.* Проектирование малошумящих фильтров высокого порядка для сигма-дельта ЦАП. № 2, с. 54.

## Микросистемы

- Амеличев В.В., Годовицын И.В., Красюков А.Ю., Поломоинов С.А., Чаплыгин Ю.А.* Оптимизация конструкции мембраны в теплодисперсионном датчике взрывоопасных газов. № 3, с. 60.
- Белов А.Н., Роцин В.М., Шевяков В.И.* Элементы микро- и наносистем в сканирующей зондовой микроскопии. № 4–5, с. 120.
- Вернер В.Д., Галушков А.И., Сауров А.Н., Шелепин Н.А.* Роль микросистемной техники в развитии инновационного потенциала НПК «Технологический центр». № 4–5, с. 113.
- Макарецкий Е.А., Овчинников А.В., Минаков Е.И.* Оптоэлектронный дистанционный измеритель давления. № 3, с. 68.
- Тимошенко С.П., Зотов С.А., Калугин В.В.* Разработка и изготовление чувствительных элементов микроэлектромеханических систем. № 4–5, с. 125.

## Микропроцессорная техника

- Бурдинский И.Н.* Микропроцессорное устройство коррекции состава рабочей смеси для двигателя внутреннего сгорания. № 2, с. 66.
- Бурдинский И.Н., Миронов А.С.* Применение технологии «конфигурируемые системы на кристалле» для исследования рабочих режимов автомобильных двигателей внутреннего сгорания. № 6, с. 79.
- Кочетков В.Ю., Переверзев А.Л., Савченко Ю.В.* Первичная обработка управляющих сигналов с времяимпульсной модуляцией в условиях наличия комбинированной помехи. № 6, с. 75.
- Лыгач В.В., Грушевский А.М.* Применение программируемых микроконтроллеров в системах дистанционного управления с распределенной структурой. № 3, с. 74.
- Шагури И.И., Мокрецов М.О., Зварич Б.В., Лат М.М., Антонов А.М.* Применение коммуникационных контроллеров в распределенных системах автоматического управления. № 2, с. 58.
- Широ Г.Э., Романов С.П.* Алгоритм синтеза радиолокационных изображений для малых углов переднебокового обзора. № 6, с. 69.

## Информационные технологии

*Абрамов А.Ю., Дубовой Н.Д., Портнов Е.М.* Концепция реализации учета электроэнергии в составе многофункциональной информационно-управляющей системы для распределительных электросетей. № 4–5, с. 168.

*Баринев В.В., Кузнецов В.С., Тепляков И.М.* Подвижные и сенсорные сети передачи данных. № 4–5, с. 157.

*Бархоткин В.А., Кочетков М.П.* Метод автоматического анализа изображений для бортовых вычислительных систем мобильных роботизированных комплексов. № 4–5, с. 143.

*Игнатова И.Г.* Инфраструктура для удаленного информационного взаимодействия в процессе подготовки и проведения научно-технической конференции. № 1, с. 62.

*Корнеева М.В.* Фрактальный анализ псевдослучайных последовательностей. № 1, с. 54.

*Назаров Л.Е.* Посимвольный прием частотно-манипулированных сигналов с непрерывной фазой, формируемых на основе двоичных блоковых кодов. № 1, с. 46.

*Переверзев А.Л.* Адаптивный цифровой фильтр на основе скользящего среднего. № 2, с. 70.

*Умняшкин С.В., Коплович Д.М.* Метод компрессии изображений на основе векторного квантования коэффициентов в области дискретных преобразований. № 4–5, с. 149.

*Щагин А.В.* Проектирование распределенных систем управления технологическими процессами непрерывных технологий. № 4–5, с. 161.

## Приборостроение

*Востриков В.А., Горбунов Б.Б., Гусев А.Н., Журип Д.В., Каменский С.А., Селищев С.В.* Медико-технические принципы проектирования внешних электрических дефибрилляторов с биполярной формой импульса. № 4–5, с. 173.

*Штерн Ю.И., Кожевников Я.С., Тарасов Р.Ю., Барабанов Д.Ю.* Перспективы развития низкотемпературного термоэлектрического приборостроения. № 4–5, с. 179.

## Интегральные радиоэлектронные устройства

*Чистюхин В.В.* Особенности проектирования приемной АФАР с расширенным сектором сканирования. № 3, с. 80.

## Методы и техника измерений

*Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скриаль Ан.В., Семёнов А.А., Абрамов А.В., Голишников А.А.* Радиоволновые и оптические измерения толщины и электропроводности металлических пленок на полупроводниковых и диэлектрических подложках. № 1, с. 68.

*Булярский С.В., Басаев А.С.* Исследование рентгеночувствительных  $p-i-n$ -структур методом термостимулированной спектроскопии глубоких уровней. № 1, с. 78.

*Зиновьев Д.В.* Аналитический метод оценки отношения сигнал/шум модулятора с передискретизацией. № 2, с. 73.

*Дёмкин В.И., Макаров Е.С., Никулин В.Б.* Алгоритм определения координат движущегося объекта. № 2, с. 77.

*Булярский С.В., Басаев А.С., Суханов В.С.* Температурные зависимости коэффициентов захвата глубоких центров в рентгеночувствительных приемниках излучения. № 6, с. 84.

*Горлов М.И., Смирнов Д.Ю., Сегал Ю.Е., Емельянов А.В.* Использование уровня шумов для контроля полупроводниковых изделий при термоциклировании. № 6, с. 89.

## Биомедицинская электроника

*Каменский С.А.* Распределение амплитуд сигнала ЭКГ при шоковых и нешоковых ритмах сердца. № 2, с. 81.

## Проблемы высшего образования

*Акуленок М.В., Голубская И.Э.* Исследование мотивационной сферы студентов. № 1, с. 83.

## Краткие сообщения

*Балашов А.Г.* Исследование порогового напряжения вертикальной МОП-структуры с использованием методов приборно-технологического моделирования. № 3, с. 90.

*Батюня Л.П.* Метод синтеза особочистых многокомпонентных оксидных порошков. № 6, с. 99.  
*Герасименко Н.Н., Жуков А.А., Герасименко Н.Н. (мл.), Тарасенков А.Н., Ловягин И.В.* Аномальное дефекто-образование в монокристаллическом кремнии при имплантации ионов фтора. № 4-5, с. 185.

*Городилов А.В.* Механизм динамического распределения ресурсов сервера между обработчиками запросов на основе прогнозирования нагрузки. № 3, с. 88.

*Золотарев В.И., Нестеров Д.В., Черный Б.И.* Индиевые микросферы для сборки ИС. № 1, с. 90.  
*Нестеров Д.В., Рудаков Г.А.* Способ монтажа фоточувствительных приемников ИК-излучения. № 2, с. 90.

*Никулин В.Б. Иноземцев Н.В.* Сравнение статистического и интервального методов при решении задач градуировки средств измерения. № 6, с. 93.

*Смирнов В.В.* Моделирование процесса термообработки подложек сапфира в аммиаке при гетероэпитаксии широкозонных нитридов. № 2, с. 88.

*Сопова О.В.* Способ повышения устойчивости двухзатворного МОП-транзистора к короткоканальным эффектам. № 3, с. 92.

*Спириин В.Г.* Исследование конструктивной погрешности сопротивления тонкопленочного резистора. № 6, с. 97.

*Тафинцев К.С.* Увеличение динамического диапазона сигма-дельта АЦП методом тройной выборки внутреннего многозарядного ЦАП. № 6, с. 95.

*Ушкар М.Н., Школьников В.М., Неудобнов Н.А.* Структура стенда отладки CAN-узлов. № 1, с. 92.

## Юбилей

Буцу Виктору Петровичу – 70 лет. № 2, с. 97.

Быкову Дмитрию Васильевичу – 60 лет. № 2, с. 95.

Валиеву Камиллю Ахметовичу – 75 лет. № 6, с. 99.

Грибову Борису Георгиевичу – 70 лет. № 2, с. 93.

Казённову Г.Г. – 70 лет. № 1, с. 95.

Памяти Якова Андреевича Федотова. № 1, с. 97.

22 Центральному научно-исследовательскому испытательному институту Министерства обороны Российской Федерации – 50 лет. № 6, с. 4.

*Телец В.А., Негина Ю.С., Орлов А.А.* Направления, базовые составляющие и условия развития микросистемной техники специального назначения. № 6, с. 9.

## Конференции. Семинары. Выставки

2-я Международная конференция по физике электронных материалов. № 1, с. 34.

5-я Международная научно-практическая конференция «Электроника и информатика – 2005». № 1, с. 4 обложки.

8 февраля – День Российской Науки. Мизтовские научные чтения. № 1, с. 98.

12-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2005». № 1, с. 4.

*Вернер В.Д., Ковалев А.А., Резнев А.А., Сауров А.Н., Чаплыгин Ю.А.* Быстрее, лучше, дешевле (выставка «Электроника - 2004» г. Мюнхен). № 3, с. 95.

Международная научно-практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». № 1, с. 67.

Об итогах 12-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2005». № 3, с. 94.

2-я Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, технике и образовании». № 6, с. 31.