

ТРА

ТЕХНОЛОГИЯ И
КОНСТРУИРОВАНИЕ В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ



В НОМЕРЕ:

Техническая политика

Электронные средства: исследования, разработки

Функциональная микро- и нанoeлектроника

Обеспечение тепловых режимов

Технологические процессы и оборудование

3(69) 2007

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2007 № 3 (69)

Год издания 31-й

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

К.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)
Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)
К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)
Д.т.н. В. П. Малахов (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин (г. Киев)
В. А. Проценко (г. Киев)
Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)
Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)
К.т.н. Э. Н. Глушеченко,
зам. гл. редактора (г. Киев)
Д.т.н. В. В. Данилов (г. Донецк)
Д.т.н. В. Т. Дейнега (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов (г. Одесса)
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. редактора (г. Одесса)
К.т.н. А. А. Ефименко,
ответственный секретарь (г. Одесса)
Л. М. Лейдерман (г. Одесса)
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)
К.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)
Д.ф.-м.н. В. В. Новиков (г. Одесса)
К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)
К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)
Д.ф.-м.н. П. В. Серба (г. Таганрог)
Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкаре́ва,
Научно-производственное
предприятие «Сатурн»,
Одесский национальный
политехнический университет,
Редакция журнала «ТКЭА»

Техническая политика

Состояние и тенденции развития волноводных излучателей на основе соединений A^3B^5 . *Каримов А. В.* 3

Электронные средства: исследования, разработки

Проектирование сумматоров в среде Active-HDL с предварительным анализом характеристик. *Паулин О. Н., Шапо Ф. С., Синегуб Н. И., Полецук С. О.* 9

Проектирование реконфигурируемых систем на ПЛИС. *Палагин А. В., Опанасенко В. Н., Лисовый А. Н.* 15

Многоканальное высокоточное устройство управления нейрончипом. *Костенко В. Л., Жаровцев С. О.* 20

Распознавание зрительных образов на основе топологической обработки информации. *Демёхин В. В., Данилов В. В.* 24

Коррекция оптических эффектов близости при проектировании микросхем. *Родионов И. А., Макачук В. В.* 30

Функциональная микро- и наноэлектроника

Новые возможности фотоэлектрического метода определения высоты барьера в структурах $Au-n-GaAs$. *Мелебаев Д., Мелебаева Г. Д., Рудь Ю. В., Рудь В. Ю.* 33

Методика определения эффективной площади фоточувствительного элемента фотодиода. *Бутенко В. К., Докторович И. В., Годованюк В. Н., Рюхтин В. В., Юрьев В. Г.* 38

Поверхностные нанообразования при окислении слоистых кристаллов SnS_2 . *Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З., Литвин О. С.* 41

Формирование прозрачных омических контактов к $p-GaN$ для светоизлучающих диодов. *Босый В. И., Данилов Н. Г., Кохан В. П., Новицкий В. А., Семашко Е. М., Ткаченко В. В., Шпоняк Т. А.* 43

Обеспечение тепловых режимов

Эффективное охлаждение мощного сверхвысокочастотного микроэлектронного блока. *Батуркин В. М., Николаенко Ю. Е., Галаутдинов Д. М., Владимиров И. Т.* 46

Использование адиабатического размагничивания парамагнитного вещества в конденсаторе тепловой трубы. *Механцев Е. Б., Замков Е. Т., Палий А. В.* 51

Технологические процессы и оборудование

Повышение качества изделий электронной техники путем моделирования стадий их производства. *Шестакова Т. В.* 53

Комбинированный способ выращивания эпитаксиальных слоев полупроводниковых соединений A^3B^5 . *Ёдгорова Д. М., Каримов А. В., Гиясова Ф. А., Саидова Р. А.* 56

Автоматизированный спектрометр глубоких уровней для исследования полупроводниковых структур. *Бойко Ю. В., Кузнецов Г. В., Савицкий С. М., Третьяк О. В.* 59

Позиционирование изображений фотошаблонов в системах автоматизированного оптического контроля. *Крылов В. Н., Щербакова Г. Ю., Козина Ю. Ю.* 61

Библиография

Новые книги 14, 23, 29, 37, 40, 52, 58

В портфеле редакции 23, 42

Выставки. Конференции 2-я, 3-я, 4-я стр. обл.

ЗМІСТ

Технічна політика

Стан та тенденції розвитку хвилевідних випромінювачів на основі сполук A^3B^5 . *Карімов А. В.* (3)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Проектування суматорів у середовищі Active-HDL з попереднім аналізом характеристик. *Паулін О. М., Шапо Ф. С., Синегуб М. І., Полещук С. О.* (9)

Проектування систем на ПЛІС з структурою, що реконфігурується. *Палагін О. В., Опанасенко В. М., Лісовий О. М.* (15)

Багатоканальний високочотний прилад керування нейрочипом. *Костенко В. Л., Жаровцев С. О.* (20)

Розпізнавання зорових образів на основі топологічної обробки інформації. *Демьохін В. В., Данилов В. В.* (24)

Корекція оптичних ефектів близькості при проектуванні мікросхем. *Родіонов І. А., Макачук В. В.* (30)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Нові можливості фотоелектричного метода визначення висоти бар'єра у структурах Au-n-GaAs. *Мелебасєв Д., Мелебасєва Г. Д., Рудь Ю. В., Рудь В. Ю.* (33)

Методика визначення ефективної площі фоточутливого елемента фотодіода. *Бутенко В. К., Докторович І. В., Годованюк В. Н., Ряхтін В. В., Юр'єв В. Г.* (38)

Поверхневі нанотворення при окисненні шаруватих кристалів SnS_2 . *Катеринчук В. М., Ковалюк М. З., Литвин О. С.* (41)

Формування прозорих омичних контактів до p-GaN для світло випромінюючих діодів. *Босий В. І., Данилов М. Г., Кохан В. П., Новицький В. О., Семашко О. М., Ткаченко В. В., Шпоняк Т. А.* (43)

Забезпечення теплових режимів

Ефективне охолодження потужного надвисокочастотного мікроелектронного блока. *Батуркін В. М., Ніколаєнко Ю. С., Галютдінов Д. М., Владимиров І. Т.* (46)

Використання адиабатичного розмагнічування парамагнітної речовини в конденсаторі теплової труби. *Механцев Є. Б., Замков Є. Т., Палій О. В.* (51)

Технологічні процеси та обладнання

Підвищення якості виробів електронної техніки шляхом моделювання стадій їх виробництва. *Шестакова Т. В.* (53)

Комбінований спосіб вирощування епітаксійних шарів напівпровідникових сполук A^3B^5 . *Йодгорова Д. М., Карімов А. В., Гясова Ф. А., Саїдова Р. А.* (56)

Автоматизований спектрометр глибоких рівнів для дослідження напівпровідникових структур. *Бойко Ю. В., Кузнецов Г. В., Савицький С. М., Третяк О. В.* (59)

Позиціонування зображень фотомасок у системах автоматизованого оптичного контролю. *Крылов В. Н., Щербакіна Г. Ю., Козіна Ю. Ю.* (61)

CONTENT

Technical polytic

Condition and tendencies of development waveguide radiator son the basis of connections A^3B^5 . *Karimov A. V.* (3)

Electronic means: investigations, development

Adders designing in Active-HDL environment with previous characteristic analysis. *Paulin O. N., Shapo F. S., Sinegub N. I., Poleschuk S. O.* (9)

Designing of PLD-based reconfigurable systems. *Palagin A. V., Opanasenko V. N., Lisovyy A. N.* (15)

Multi-channel exacting control device of neurochip. *Kostenko V. L., Zharovtsev S. O.* (20)

Differentiation of visual patterns on the basis of topological processing of information. *Demyokhin V. V., Danilov V. V.* (24)

Optical proximity correction in IC production. *Rodionov I. A., Makarchuk V. V.* (30)

Functional micro- and nanoelectronics

New possibilities of photoelectric method of determination barrier height in structures Au-n-GaAs. *Melebayev D., Melebayeva G. D., Rud Yu. V., Rud V. Yu.* (33)

Determination procedure of the photodiode responsive element effective area. *Butenko V. K., Doktorovich I. V., Godovaniouk V. N., Ryukhtin V. V., Yuryev V. G.* (38)

Surface nanoformations under oxidation of SnS_2 layered crystals. *Katerynychuk V. M., Kovalyuk M. Z., Lytvyn O. S.* (41)

Formation of transparent ohmic contacts to p-GaN for light emitting diodes. *Bosiy V. I., Danilov N. G., Cohan V. P., Novitskiy V. A., Semashko E. M., Tkachenko V. V., Shponiak T. A.* (43)

Ensuring of thermal modes

Effective cooling of powerful super high-frequency microelectronic unit. *Baturkin V. M., Nikolaenko Yu. E., Galiautdinov D. M., Vladimirov I. T.* (46)

Using the adiabatic demagnetization paramagnetic substance in the heat pipe condenser. *Mekhtantsev E. B., Zamkov E. T., Paliy A. V.* (51)

Technological processes and equipment

Quality improvement of electronic technics products by modelling of stages of their manufacture. *Shestakova T. V.* (53)

Combined way of cultivation of epitaxial layers of semiconductor connections A^3B^5 . *Yodgorova D. M., Karimov A. V., Giasova F. A., Saidova R. A.* (56)

Automated spectrometer of deep levels for research semiconducting structures. *Boiko Yu. V., Kuznetsov G. V., Savitsky S. M., Tretyak O. V.* (59)

Circuits masks images alignment for automatic optical inspection systems. *Krylov V. N., Shcherbakova G. Yu., Kozina Yu. Yu.* (61)

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ

Узбекистан, г. Ташкент, НПО «Физика–Солнце»
E-mail: karimov@uzsci.net

Дата поступления в редакцию
19.12.2006 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ
(ДонНУ, г. Донецк)

СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВОЛНОВОДНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ A^3B^5

Приведенный анализ представляет интерес при конструировании различных видов излучателей, предназначенных для оптических систем передачи информации.

Передача информационных данных и видеосигналов с помощью обычных проволочных кабелей уже перестает удовлетворять постоянно растущие потребности абонентов, в то время как качество и скорость передачи сигналов с помощью оптических волокон постоянно возрастают. Оптическое волокно характеризуется широкой полосой и меньшими потерями, чем коаксиальный кабель [1]. Оно позволяет передавать изображения с высоким разрешением на весьма далекие расстояния без применения мощных усилителей или ретрансляторов. Кроме того, благодаря передаче сигнала в виде светового луча, а не электрического тока, система становится полностью невосприимчивой к любым видам электромагнитных помех, включая высоковольтные линии электропередачи [2].

Оптическое волокно является альтернативой металлическим коммуникационным линиям, кабелям, связывающим между собой два объекта. Прием и передача информации между ними с помощью оптического волокна представляет собой волоконно-оптическую систему связи. В такой системе выделяют три различные по скорости передачи информации и дальности связи группы линий связи, в которых используются разные виды светоизлучающих и фотоприемных элементов, а также светодиодов [3]. К первой группе относятся волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) с небольшой скоростью передачи информации (до нескольких десятков Мбит/с). В них в качестве светоизлучающих и фотоприемных элементов используются светодиоды и $p-i-n$ -фотодиоды, многомодовые оптические волокна. Ко второй группе относятся волоконно-оптические системы на основе полупроводниковых лазеров и лавинных фотодиодов, работающих в полосе 1,3 мкм. К третьей группе относятся ВОЛС с высокой скоростью передачи информации и большой дальностью связи, использующие излучение от одномодового лазера с распределенной обратной связью с длиной волны 1,55 мкм с минимальной потерей излучения.

В настоящее время быстрыми темпами развиваются системы дальней оптической связи на расстоя-

ния в тысячи километров — благодаря появлению оптических усилителей на основе световодов, легированных эрбием, способных усиливать проходящие по световоду сигналы на 30 дБ [4]. Однако с ростом скорости передачи данных относительно низкое быстродействие эрбиевых усилителей вызовет ряд проблем, в результате чего рамановские волоконные усилители (ВКР) [5] становятся весьма перспективными. Появление новых оптических волокон, легированных германием, с "окном прозрачности" в 500 нм в диапазоне 1,2—1,7 мкм открывает новые возможности и требует совершенствования электронных компонентов систем передачи и приема оптических сигналов [6]. Вместе с тем создаются физические основы альтернативных — солитоновых систем связи.

На сегодняшний день основная задача ученых и разработчиков состоит в обеспечении оптимального сопряжения полупроводниковых элементов и оптических каналов связи. Для эффективного функционирования волоконно-оптических систем целесообразно подбирать и разрабатывать специальные волноводные излучатели с соответствующими размерами, высокой скоростью переключения, возможностью перестройки рабочей частоты, способностью работать при комнатной температуре [7—9], и фотоприемники [10—13] со стабильными параметрами.

В настоящей работе представлены результаты проводимых исследований электронных компонентов волоконно-оптических систем и их особенности, а также тенденции усовершенствования технологических аспектов различных волноводных излучателей.

Физико-технологические аспекты улучшения параметров оптоволоконных излучателей

Успехи одного из наиболее быстро развивающихся направлений современной лазерной физики связаны с проведением широких комплексных фундаментальных исследований, которые обеспечили создание не только волоконных световодов с предельно низкими потерями, но и уникальных источников когерентного излучения в необходимом спектральном диапазоне. Однако требование увеличения скорости передачи и обработки информации ставит на повестку дня необходимость создания оптических каналов передачи информации со спектральным уплотнением. Именно на решение этой проблемы в значительной мере и направлены усилия ученых. Дальнейший прогресс невозможен без детальных фундаментальных иссле-

дований в области разработки новых элементов систем связи: высокоэффективных источников оптического излучения, оптических усилителей и волоконных световодов.

Оптический передатчик преобразует входной электрический сигнал в модулированный световой поток для его дальнейшей передачи по оптоволокну, обычно это полупроводниковый лазер или светодиод. Оба служат одной и той же цели — генерации микроскопического светового пучка диаметром 10—65 мкм, который можно с высоким КПД ввести в волокно и с высокой частотой модулировать (изменять по интенсивности). В современных оптических линиях связи наиболее широко используются полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью. Лазеры обеспечивают более высокую интенсивность пучка, чем светодиоды, и допускают более высокую частоту модуляции, поэтому они часто используются для широкополосных линий большой протяженности (например, телекоммуникации или кабельное телевидение). С другой стороны, светодиоды — более дешевые и вполне подходящие для большинства систем небольшой или средней протяженности [14].

Помимо функционального назначения (т. е. какой сигнал нужно передавать), волоконно-оптический передатчик характеризуется еще двумя важными параметрами, определяющими его свойства. Первый — это выходная мощность оптического излучения, а второй — длина волны испускаемого света. Обычно это 850, 1310 или 1550 нм — значения, выбранные из условия совпадения с окнами прозрачности в характеристике пропускания материала оптического волокна.

Несмотря на разнообразие технологии и структуры полупроводниковых лазеров, основная проблема — температурная зависимость их параметров — свойственна всем категориям полупроводниковых лазеров. В основе этой проблемы лежит еще сравнительно большая плотность пороговых токов, которую, по возможности, необходимо уменьшать.

В области лазерной физики и технологии наблюдается тенденция непрерывного обогащения новыми данными. Теоретические обоснования улучшения параметров полупроводниковых лазеров при переходе на технологию с квантовыми точками находят экспериментальное подтверждение. Так, в работе [15] теоретически подробно рассмотрены зависимости коэффициента усиления, тока прозрачности, порогового тока, характеристической температуры и порога многомодовой генерации от поверхностной концентрации и дисперсии размеров ансамбля квантовых точек, длины полоски и толщины волноводной области резонатора, свойств гетероконтактов и температуры. Результаты анализа представлены в виде рекомендаций для практической реализации лазеров на квантовых точках, существенно превосходящих по своим рабочим параметрам используемые в настоящее время полупроводниковые лазеры. На основании структур InAs–InGaAs с квантовыми точками в буферном слое InGaAs, выращенных на подложках GaAs, с содержанием индия около 20% получены длинноволновые (1,46—1,5 мкм) лазеры [16]. Максимальная выходная мощность лазеров составила 7 Вт

в импульсном режиме при комнатной температуре. Дифференциальная эффективность прибора с длиной резонатора 1,5 мм составила 50%. Температурная зависимость пороговой плотности тока в диапазоне 10—73°C описывается характеристической температурой 61 К.

Методом МОС-гидридной эпитаксии получены лазеры на гетероструктурах InGaAsP/InP с широким мезаполосковым контактом (100 мкм), излучающие в диапазоне 1,3—1,5 мкм [17]. В них обнаруживался перегрев активной области лазерного диода на 30—60°C относительно медного тепловода в режиме насыщения мощности излучения в непрерывном режиме генерации. При этом достигнута оптическая мощность излучения 3 и 2,6 Вт в непрерывном режиме генерации, 9 и 6,5 Вт — в импульсном режиме генерации соответственно на длинах волн 1,3 и 1,5 мкм. Установлена сильная зависимость максимальной мощности от температуры.

Обращают внимание приемы улучшения параметров лазеров, работающих в спектральном диапазоне 980—1100 нм и перспективных для применения в кабельном телевидении, сети передачи данных, телефонии и др. Для уменьшения температурной чувствительности лазерных InGaAs/GaAs/AlGaAs-гетероструктур, получаемых МОС-гидридной эпитаксией, предлагается увеличить глубину потенциальной ямы активной области путем оптимизации геометрии и профиля легирования структуры [18]. В результате на таких структурах в непрерывном режиме генерации оптическая мощность излучения доведена до 6,5 Вт на длине волны излучения 0,98 мкм при внутреннем квантовом выходе 85—95%. Исследования проводились в температурном диапазоне 0—70°C. В работе [19] путем подбора состава активной области InGaAs/AlGaAs/GaAs-гетероструктуры получены лазеры, излучающие в спектральном диапазоне 1,03 мкм. При постоянной температуре тепловода 10°C в непрерывном режиме достигнута выходная мощность 9,2 Вт. При длине резонатора 2 мм получен максимальный КПД 66%.

По спектральному составу используемые в волоконно-оптических системах лазеры могут иметь как многомодовый, так и одномодовый, в пределе одночастотный, режимы генерации в зависимости от назначения и конструкции. В этом аспекте представляют интерес экспериментальные и теоретические исследования внутреннего квантового выхода стимулированного излучения лазерных диодов на основе двойных InGaAsP/InP-гетероструктур отдельного ограничения ($\lambda=1,5\dots 1,6$ мкм) с различным дизайном волноводного слоя [20]. Лазерные гетероструктуры с различным дизайном волноводного слоя изготавливались методом МОС-гидридной эпитаксии. Максимальное значение внутреннего квантового выхода стимулированного излучения $\approx 97\%$ было достигнуто в структуре с двойным ступенчатым волноводом, характеризующейся минимальными утечками в *p*-эмиттер за порогом генерации за счет образования низкой концентрации неравновесных носителей на границе "волновод—*p*-эмиттер". В работе [21] продемонстрирована возможность генерации излу-

чения 1,2—1,5 мкм в непрерывном режиме в AlGaInAs/InP многоямных лазерных гетероструктурах при температуре окружающей среды 170°C без принудительного охлаждения. Абсолютные значения порогового тока достигали 10 мА для лазерных диодов с шириной полоски $W=4,5$ мкм и длиной резонатора 200 мкм. Пороговые плотности тока составили 500—650 А/см² при длине резонатора 1,0 мм.

Преимуществами лазерных диодов являются малые размеры тела свечения и, как следствие, узкая диаграмма направленности (3—20°), большая мощность излучения, линейная зависимость излучаемой мощности от тока накачки и высокая частота модуляции. Поэтому они используются для широкополосных одномодовых линий связи большой протяженности. Недостатком лазерных диодов является необходимость их термостатирования для обеспечения одномодового режима работы, что влечет за собой удорожание оптического передатчика.

В волоконно-оптических системах, предназначенных для передачи сигнала на не очень большие расстояния, в качестве источника оптического излучения могут применяться светодиоды. В отличие от лазера, обладающего остронаправленным когерентным лучом, в светодиоде излучение происходит спонтанно (самопроизвольно), и луч имеет меньшую мощность (5—20 мВт) и широкую направленность (60—80°). Светодиоды также обладают высокой линейностью модуляционной характеристики, устойчивы к изменениям окружающей температуры и характеризуются низкой стоимостью. Поэтому они наиболее часто используются в технике охранного телевидения. Передатчик часто имеет миниатюрные размеры, что позволяет смонтировать его непосредственно в кожухе вместе с камерой. В этом направлении проводятся интенсивные теоретические и экспериментальные исследования различных вариантов структур с оптическими микрорезонаторами и активными слоями на основе квантовых точек InGaAs/GaAs, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs [22]. В частности, реализованы светодиоды диапазона 1,3 мкм, обладающие узкой спектральной характеристикой и низкой расходимостью светового пучка. В структуре с оксидированными зеркалами AlO/GaAs получена лазерная генерация в вертикальном направлении на длине волны 1,3 мкм при инжекционной накачке. Следует отметить, что в зависимости от характера исходного сигнала в передатчике может использоваться как линейная амплитудная, частотная, так и различные типы импульсной модуляции.

Таким образом, независимо от технологии изготовления или конструкции волноводного излучателя, всем им свойственна температурная зависимость параметров, обусловленная высоким значением плотности рабочих токов. Одним из путей уменьшения порогового тока, возможно, является создание физических условий, обеспечивающих процессы внутреннего усиления излучаемого сигнала или создание безынкционного излучателя.

Вывод оптического излучения и технология получения полупроводниковых структур

Наряду с инженерией квантовых точек набирает темпы получение излучения новыми способами [23—25]. В работе [25] вместо излучения фотонов предлагают использовать испускание оптических фононов. До сих пор этот процесс приводил к тому, что электрон, пройдя 40 каскадов типичного каскадного лазера, испускал только один фотон, а все остальное — оптические фононы. Теперь оптический фонон стал использоваться для получения излучения, т. е. переход с испусканием оптического фонона позволил быстро очищать нижний уровень и поддерживать лазерный режим терагерцовой генерации.

Использование кольцевого микрорезонатора, частота моды которого совпадает с резонансной частотой перехода электрона между уровнями энергии в квантовой яме гетероструктуры GaAs/Al_{0,15}Ga_{0,85}As, позволил получить терагерцовый каскадный лазер, излучающий волны в диапазоне частот 3,0—3,8 ТГц [26]. В работе [27] для создания квантовых каскадных лазеров с когерентным (баллистическим) транспортом электронов предлагается использовать трехбарьерные полупроводниковые гетероструктуры, у которых переходы электронов осуществляются на уровень трехбарьерной структуры, рождающийся из уровней смежных квантовых ям, имеющих разную четность волновых функций электронов. При этом можно добиться существенного расширения этого уровня по сравнению со случаем одной четности, что, в свою очередь, позволяет облегчить условия когерентного транспорта электронов и увеличить интегральную отрицательную динамическую проводимость структуры.

Исследователи работы [28] получили транзисторный лазер, способный работать при комнатной температуре на частоте 3 ГГц, обеспечивающий быструю обработку сигналов и повышение эффективности электрически и оптически интегрированных схем. Также в [28] появились сообщения о создании нового твердотельного лазера, потребляющего меньше энергии по сравнению с известными структурами излучателей. Теоретически этот лазер может передавать более 100 млрд. бит в секунду против 20 млрд. бит в секунду, имеющих место в типичных излучателях. Основой нового лазера является фотонный кристалл толщиной 300 нм, в котором вытравлен массив регулярно расположенных (9×9) отверстий, каждое диаметром 400 нм. Пространства между отверстиями, называемые микрополостями, захватывают свет.

Кристалл состоит из четырех слоев GaInAsP, так называемых «квантовых колодцев». Соответственно, при облучении кристалла светом энергия света «закачивается» в «квантовые колодцы», заставляя их переизлучать на требуемой длине волны. Многократно отражаясь от стенок микрополостей, световое излучение формирует лазерный луч. Полученный таким образом лазер имел выходную мощность 12 мВт при мощности накачки $2,4 \cdot 10^{-3}$ Вт, т. е. был примерно в 20 раз эффективнее лазера с одиночной полостью. Кроме того, этот лазер очень мал: около 400 тыс.

таких лазеров можно разместить на чипе площадью 1 см². В перспективе планируется накачивать лазер не с помощью света, а с помощью электричества, и разработать методы интеграции лазера в чипы, чтобы создать оптическую передачу данных внутри компьютера, повысив тем самым его быстродействие.

Наряду с новыми принципами, в качестве одного из перспективных подходов к повышению выхода оптического излучения рассматривается использование квантового размерного эффекта не только в полупроводниковых соединениях, но и в кремниевых структурах. Вместо пористого кремния, получаемого травлением *c*-Si в растворах плавиковой кислоты, теперь основное внимание сосредоточено на технологически удобных и стабильных наноструктурах. Так, группа исследователей [29] сообщила о практически промышленном методе формирования люминесцирующих кремниевых нанокристаллов со средними размерами от 2 до 8 нм, сравнительно узким распределением по размерам (0,5—0,7 нм) и производительностью 14—52 мг/ч.

И вот, пока основные усилия исследователей концентрировались на «нанокристаллическом» и «редкоземельном» направлениях борьбы за свечение кремния, произошел «прорыв» в несколько неожиданном месте. В частности, сразу несколькими группам удалось преодолеть термическое гашение краевой люминесценции *c*-Si за счет формирования в активной области дислокационных петель с размерами 10—100 нм (рис. 1, 2) [30], которые ограничивали диффузию и безызлучательную рекомбинацию носителей заряда. Дислокационные петли образовывались

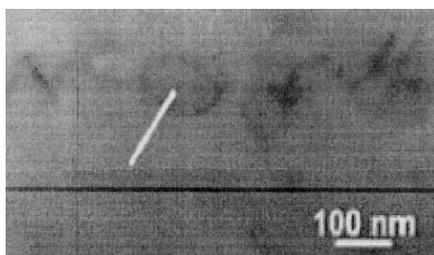


Рис. 1. Изображение в светлом поле просвечивающего электронного микроскопа вблизи [110] Si образца с петлями дислокаций, образованными при ионной имплантации бора [30]

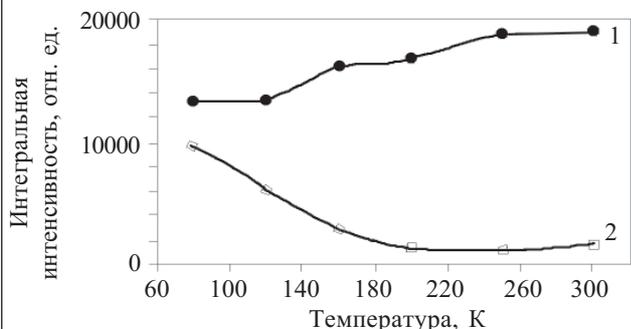


Рис. 2. Температурная зависимость интегральной интенсивности электролюминесценции для обычного светодиода (1) и светодиода с дислокационными петлями (2). $I_{\text{прям}} = 3 \text{ А/см}^2$ [30]

в результате имплантации бора и последующего отжига. Были получены кремниевые светодиодные структуры, излучающие на длине волны 1,15 мкм с квантовыми эффективностями 0,1% [7] и 0,02% [8] при комнатной температуре. Аналогичные результаты получены в работе [9] в кремниевых светодиодах, работающих при комнатных температурах при введении (с помощью пластической деформации) дислокаций, т. е. с квантовой эффективностью 0,1% на длине волны около 1,5 мкм (энергия фотонов 0,8 эВ, что соответствует положению уровней энергии дислокационных состояний).

Достигнутые величины пока ниже рекордных (1%), полученных на сверхчистом *c*-Si со специально текстурированной поверхностью [31, 32]. Несмотря на это, авторы работ [27, 33, 34] полны оптимизма, поскольку они использовали достаточно стандартные *p-n*-переходы без оптимизации вывода излучения из структуры. При этом ожидается, что текстурирование поверхности позволит увеличить выход электролюминесценции в несколько раз.

Обнадеживающие результаты ожидаются также в связи с совершенствованием наноструктур, требующих получения гетероструктур с несовпадающими самоорганизующимися параметрами решеток пленки и подложки. Для достижения этих целей широкое применение находит жидкофазная эпитаксия, выбор которой обусловлен многолетним опытом, накопленным по развитию этого метода для получения полупроводниковых соединений A^3B^5 , в особенности систем GaAs–InAs, GaAs–Ga(In)P, создающих непрерывный твердый раствор InGaAsP (рис. 3) с широким набором значений ширины запрещенной зоны и физических свойств. С использованием этого материала были созданы источники и приемники оптического излучения для оптоволоконных линий связи, работающих в ближнем инфракрасном диапазоне 1,3—1,5 мкм. В частности, широкозонные твердые растворы InGaAsP нашли применение при создании лазеров и светодиодов видимого диапазона.

В большинстве случаев тонкие пленки InGaAsP выращивались методом ступенчатого охлаждения ($\Delta T = 10^\circ\text{C}$) при низких температурах (670°C) на подложках GaAs [35]. Несмотря на наличие разницы в

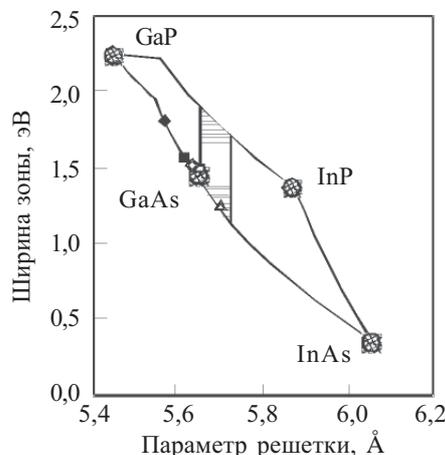


Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны в четверном твердом растворе InGaAsP от постоянной решетки [35]

параметрах решетки InAs и GaAs, эпитаксиальные слои InGaAs, выращенные на текстурированных подложках, можно рассматривать как свободные ненапряженные пленки [36]. Вместе с тем метод жидкостной эпитаксии имеет уникальные возможности и по части получения тонких слоев толщиной от 20 Å [37] и резких гетеропереходов, вплоть до получения квантовых точек.

Особенность этого метода в простоте и дешевизне, в возможности реализации разных сложных структур. Этот метод может сыграть решающую роль при создании безынджекционных излучателей, т. е. с внутренним усилением. Поэтому метод жидкостной эпитаксии широко используется для решения проблем улучшения параметров полупроводниковых структур, связанных с физико-технологическими задачами, такими как оптимизация состава, получение заданной концентрации носителей в активных областях, подавление перекрестного легирования между формируемыми областями структуры. Например, резкие переходы между слоями могут быть получены из раствора-расплава, охлаждаемого с уменьшающейся скоростью [38]. Специально разработанные устройства жидкостной эпитаксии [39] и предложенные способы [40] позволяют управлять составом выращиваемых индий- или алюминийсодержащих слоев полупроводниковых соединений A^3B^5 [41].

Жидкостная эпитаксия обладает такими широкими возможностями, что с ее помощью, управляя температурным режимом и составом раствора-расплава, можно получить тонкие эпитаксиальные слои на трудносмачиваемых текстурированных поверхностях [42], а также создавать выращенные текстуры в процессе эпитаксиального роста [43]. В работе [42, с. 133—139] авторы показывают возможности и технологические нюансы получения пленки $nGaAs$ и гетерослоев толщиной 0,5—1 мкм AlGaAs на микрорельефных подложках n^+GaAs (рис. 4, а) при принудительном охлаждении раствора-расплава в сдвиговом графитовом контейнере — “пенального” типа. Здесь следует отметить, что рост слоев на текстурирован-

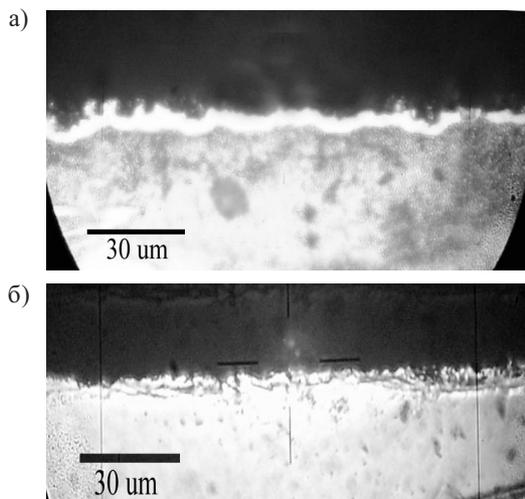


Рис. 4. Микрофотография скола подложки $nGaAs$ с дендритообразной поверхностью (а) и с выращенным эпитаксиальным гетерослоем $pAlGaAs$ (б)

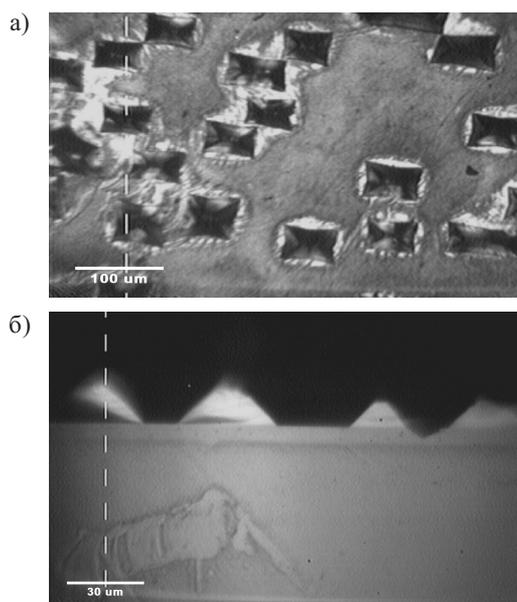


Рис. 5. Микрофотографии поверхности (а) и скола торца (б) выращенного из жидкой фазы поверхностного микрорельефа на структуре $pAlGaAs$

ных поверхностях удалось получить за счет контролируемого управления степенью насыщения раствора-расплава.

Авторы работы [43] показали особенности применения технологии жидкостной эпитаксии при формировании $nGaAs-pAlGaAs$ -структур с выращенным поверхностным микрорельефом. Как показано на рис. 5, поверхности структуры $pAlGaAs$, легированной различными примесями, покрыты так называемыми “звездочками” размерами порядка 4 мкм с соответствующими выступами, причем граница $p-n$ -перехода является ровной.

Таким образом, анализ приведенных выше работ показывает, что ведутся интенсивные исследования по получению структур с квантовыми точками и ямами, со сверхрешетками на плоских, пористых и микрорельефных поверхностях кремния и арсенида галлия с применением различных технологий. Среди них можно выделить широкие возможности метода жидкостной эпитаксии как одной из технологий, представляющих интерес для создания волноводных излучателей с внутренним усилением на основе соединений A^3B^5 .

Заключение

За последние годы быстрыми темпами развивается лазерная физика, разрабатываются новые принципы преобразования электрического и оптического сигналов, технологии получения нано- и гетероструктур. Однако, независимо от технологии изготовления или конструкции волноводных излучателей, всем им свойственна температурная зависимость параметров, обусловленная высоким значением плотности рабочих токов. Одним из путей уменьшения порогового тока может быть создание физических условий, обеспечивающих процессы внутреннего усиления излучаемого сигнала, т. е. создание безынджекционного излучателя.

Наряду с технологией полупроводниковых соединений A^3B^5 быстрыми темпами развиваются методы формирования наноструктур на основе кремния. Получены лазеры с внутренним усилением на гетероструктурах GaAs/Al_{0,15}Ga_{0,85}As с квантовыми ямами и на с-Si, работающие при комнатной температуре, излучатели на транзисторах, различные оптические усилители. Метод жидкостной эпитаксии постоянно совершенствуется, открывая широкие возможности для создания структур нового поколения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Чео П. К. Волоконная оптика. Приборы и системы.— М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Оокоси Т. Оптоэлектроника и оптическая связь.— М.: Мир, 1988.
3. Забейайлов М. О., Томашук А. Л., Николин И. В. и др. Механизмы поглощения света в гамма-облученных заготовках для волоконных световодов на основе высококачественного кварцевого стекла // ПЖТФ.— 2005.— Т. 31, вып. 12.— С. 16—20.
4. Masuda H., Kawai S., Aida K. Wide-band and low-noise optical amplification using distributed Raman amplification and Er-doped fiber amplifier // OFC conference.— San Jose.— 1998.— PD7.
5. http://www.radiator.net/radio_amator/optovolokno.php
6. Дианов Е. М. Волоконно-оптические системы связи со спектральным уплотнением каналов // Вестник РАН.— 2000.— Т. 70, № 11.— С. 1010—1015.
7. Helm M. The realization of an efficient Si based light emitter or even a laser. // Microelectronics Journal.— 2005.— Vol. 36.— P. 957—962.
8. Lourenco M., Milosavljevic M., Gwilliam R. M. et al. Optimising dislocation-engineered silicon light-emitting diodes // Appl. Phys. Lett.— 2005.— Vol. 87.— P. 261108(1)—261108(3).
9. Schröter W., Hedemann H., Kveder V., Riedel F. Silicon light-emitting diodes based on dislocation-related // Ibid.— 2004.— Vol. 84.— P. 2106—2108.
10. Karimov A. V., Yodgorova D. M., Yakubov E. N. Research of structures corrugated photoreceiving surface // Journal Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics.— 2004.— Vol. 7, N 4.— P. 378—382.
11. Муминов Р. А., Каримов А. В., Якубов Э. Н. Фотоприемники на основе арсенида галлия для инфракрасного диапазона // ДАН РУз.— 2004.— № 3.— С. 34—37.
12. Гордеев Н. Ю., Карачинский Л. Я., Новиков И. И. и др. Волноводные фотоприемники в системе InGaAsP/InP для измерения автокорреляционных функций излучения малой мощности на длине волны 1,55 мкм // ФТП.— 2002.— Т. 36, вып. 6.— С. 754—756.
13. Астахова А. П., Журтанов Б. Е., Именков А. Н. и др. Длинноволновые фотодиоды на основе двойной гетероструктуры n-GaSb/n-GaInAsSb/p-AlGaAsSb // ПЖТФ.— 2007.— Т. 33, вып. 1.— С. 23—29.
14. Зотова Н. В., Ильинская Н. Д., Карандашев С. А. и др. Флип-чип светодиоды на основе InAs с буферными слоями из InGaAsSb // ФТП.— 2006.— Т. 40, вып. 8.— С. 1004—1008.
15. Асрян Л. В., Сурис Р. А. Теория пороговых характеристик полупроводниковых лазеров на квантовых точках. Обзор // Там же.— 2004.— Т. 38, вып. 1.— С. 3—25.
16. Максимов М. В., Шерняков Ю. М., Крыжановская Н. В. и др. Мощные лазеры на квантовых точках InAs—InGaAs спектрального диапазона 1,5 мкм, выращенные на подложках GaAs // Там же.— 2004.— Т. 38, вып. 8.— С. 763—766.
17. Голикова Е. Г., Курешов В. А., Лешко А. Ю. и др. Свойства гетеролазеров на основе InGaAsP/InP с широким мезаполосковым контактом // Там же.— 2000.— Т. 34, вып. 7.— С. 886—890.
18. Булаев П. В., Капитонов В. А., Лютецкий А. В. и др. InGaAs/GaAs/AlGaAs-лазеры с широким контактом, полученные методом МОС-гидридной эпитаксии // Там же.— 2002.— Т. 36, вып. 9.— С. 1144—1148.
19. Лившиц Д. А., Егоров А. Ю., Кочнев И. В. и др. Рекордные мощностные характеристики лазеров на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs-гетероструктур // Там же.— 2001.— Т. 35, вып. 3.— С. 380—384.
20. Скрынников Г. В., Зегря Г. Г., Пихтин Н. А. и др. О внутреннем квантовом выходе стимулированного излучения InGaAsP/InP-гетеролазеров ($\lambda=1,55$ мкм) // Там же.— 2003.— Т. 37, вып. 2.— С. 243—248.
21. Слипченко С. О., Лютецкий А. В., Пихтин Н. А. и др. Низкопороговые лазерные диоды на основе AlInGaAs/InP гетероструктур (1,2—1,5 мкм) // ПЖТФ.— 2003.— Т. 29, вып. 3.— С. 65—73.
22. Сахаров А. В., Крестников И. Л., Малеев Н. А. и др. Вертикальные микрорезонаторы на 1,3 мкм с InAs/InGaAs-квантовыми точками и приборы на их основе // ФТП.— 2001.— Т. 35, вып. 7.— С. 889—893.
23. Дураев В. П. Источники оптического излучения // В кн.: Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы / Под ред. С. А. Дмитриева, Н. Н. Слепова.— М.: Connect, 2000.— С. 73—92.
24. Спирин А. А. Введение в технику волоконно-оптических сетей. <http://www.dlink.ru/technology/optic1.php>
25. <http://perst.issph.kiae.ru>. Т. 12, вып. 24. 30 декабря 2005 г. С. 1—8. Светоизлучающие кремниевые устройства.
26. Fasching G., Benz A., Unterrainer K. et al. Terahertz micro-cavity quantum-cascade lasers // Appl. Phys. Lett.— 2005.— Vol. 87.— P. 211112—211113.
27. Гельвич Э. А., Голант Е. И., Пашковский А. Б. Когерентный квантовый каскадный лазер на комбинации четных и нечетных уровней трехбарьерной структуры // ПЖТФ.— 2006.— Т. 32, вып. 5.— С. 13—18.
28. Оптические передатчики. (Обзор новостей, сентябрь—декабрь 2005) <http://livescience.ru/content/view/72/38/>
29. Mangolini L., Thimsen L. E., Kortshagen U. I made poly-disperse nanocrystals in the size range 5—50 nanometers // Nano Letters.— 2005.— Vol. 5.— P. 655—659.
30. Jiang Z. Y., Zhang Z., Friedrich K. Prediction on wear properties of polymer // J. Non-Crystalline Solids.— 2005.— Vol. 351.— P. 3325—3333.
31. Parretta A. Camera for recording light backscattered from textured photovoltaic samples // J. Opt. A: Pure Appl. Opt.— 2003.— Vol. 5.— P. 284—292.
32. Campbell P., Green M. A. Light trapping properties of pyramidally textured surfaces // Journal of Applied Physics.— 1987.— Vol. 62, N 1.— P. 243—249.
33. Chen Sh. A., Chuang K. R., Chao C. I., Lee H. T. Silicon radiation of white light // Synthetic Metals.— 1996.— Vol. 82.— P. 207—210.
34. Kittler M., Reiche M., Arguirov T. et al. Dislocation engineering for a silicon-based light emitter at 1.5 μm // International Electron Devices Meeting.— 2005.— Digest.— P. 1005—1008.
35. Альперович В. Л., Болховитянов Ю. Б., Чикичев С. И. и др. Эпитаксиальный рост, электронные свойства и фотокатодные применения напряженных псевдоморфных слоев InGaAsP/GaAs // ФТП.— 2001.— Т. 35, вып. 9.— С. 1102—1110.
36. Солдатенков Ф. Ю., Улин В. П., Яковенко А. А. и др. Ненапряженные эпитаксиальные пленки In_{1-x}Ga_xAs, полученные на пористом GaAs // ПЖТФ.— 1999.— Т. 25, вып. 21.— С. 15—20.
37. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП.— 1998.— Т. 32, вып. 1.— С. 3—18.
38. Каримов А. В., Едгорова Д. М., Юлдашев Ш. Ш., Болтаева Ш. Ш. Физико-технологические основы получения резкого p-n-перехода // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2006.— № 4.— С. 59—60.
39. А. с. 913759 СССР. Устройство для жидкостной эпитаксии / А. В. Каримов, М. Мирзабаев, Ш. З. Миртурсунов, Н. Ф. Мухитдинова.— 1981.
40. А. с. 1037795 СССР. Способ эпитаксиального наращивания полупроводниковых соединений типа A^3B^5 / А. В. Каримов, Ш. З. Миртурсунов.— 1983.
41. Yodgorova D. M., Karimov A. V. Features of growth epitaxial layers of firm solutions on a basis of indium's and aluminium's arsenide // Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics.— 2004.— N 4.— P. 382—385.
42. Каримов А. В., Едгорова Д. М. Физические явления в арсенидгаллиевых структурах с микрослойным квазизопериодическим переходом.— Ташкент: Фан, 2005.
43. Yodgorova D. M., Karimov A. V. Formation of microrelief structures by epitaxial technology // RIO 5 "World Climate & Energy Event". Book of Proceedings.— 2005.— P. 97—102.

К. т. н. О. Н. ПАУЛИН, к. т. н. Ф. С. ШАПО,
Н. И. СИНЕГУБ, С. О. ПОЛЕЦУК

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: paulin@te.net.ua

Дата поступления в редакцию
28.11 2006 г.

Оппонент к. т. н. В. Н. ОПАНАСЕНКО
(Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова,
г. Киев)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУММАТОРОВ В СРЕДЕ ACTIVE-HDL С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ АНАЛИЗОМ ХАРАКТЕРИСТИК

На основе метода предварительного анализа 1 младших разрядов выравнивающей разности проектируется ряд оригинальных суммирующих устройств чисел с плавающей запятой.

Применение средств вычислительной техники в различных областях научно-производственной деятельности требует проектирования цифровых операционных устройств (ОУ) с различными характеристиками как по быстродействию, так и по аппаратным затратам. Предварительная оценка этих параметров может быть осуществлена путем моделирования данных операционных устройств на основе современных специализированных языков и соответствующих САПР. Однако ОУ, спроектированные на основе известных методов, уже не в полной мере удовлетворяют требованиям потребителей.

В данной работе на основе метода предварительного анализа 1 младших разрядов выравнивающей разности с применением современных САПР проектируется ряд оригинальных суммирующих устройств чисел с плавающей запятой.

В [1] рассмотрены функциональные модели суммирующих устройств чисел с плавающей запятой с последовательным и параллельным выполнением микроопераций “классической” макрооперации суммирования чисел с плавающей запятой, описанные на HDL-языке Verilog [2, 3] и сформированные из Verilog-описаний функциональных моделей всех блоков, входящих в их состав. Пример Verilog-описания модели блока сумматоров мантисс Full_Adder представлен на **листинге**.

Листинг

Verilog-описание функциональной модели блока сумматоров мантисс Full_Adder

```
“timescale 10 ns / 1 ps
// Заголовок модуля блока сумматоров
module Full_Adder (Carry_In, Mant_1, Mant_2, Sum,
Carry_Out);
input Carry_In, Mant_1, Mant_2;
output Sum, Carry_Out;
parameter Setting_Time = 10;
parameter n = 7;
parameter k = n-1;
wire Carry_In, Carry_Out;
```

```
wire [n:0] Mant_1, Mant_2, Sum;
wire [k:0] P; // Нулевая n-разрядная константа
assign P = {n{1'b0}};
assign #Setting_Time {Carry_Out, Sum} = Mant_1 +
Mant_2 + {P, Carry_In};
endmodule
```

Name	Value	50	100 ns	150
Carry_In	1			
Mant_1	88	88		
Mant_2	88	88		
Sum	11	11		
Sum(7)	0			
Sum(6)	0			
Sum(5)	0			
Sum(4)	1			
Sum(3)	0			
Sum(2)	0			
Sum(1)	0			
Sum(0)	1			
Carry_Out	1			

Рис. 1. Временная диаграмма работы модуля Full_Adder

На **рис. 1** показана полученная в среде моделирования Active-HDL временная диаграмма работы модуля Full_Adder, на входы Carry_In, Mant_1, Mant_2 которого поступают отображаемые в двоично-шестнадцатеричном и шестнадцатеричном кодах значения сигналов “1” (1), “10001000” (88) и “10001000” (88), соответственно. Через время задержки, определяемое параметром Setting_Time = 10, в соответствии с функциональным назначением блока сумматоров мантисс, на выходах Sum, Carry_Out модуля формируются значения суммы мантисс “00010001” (11) и переноса “1” (1), соответственно.

На **рис. 2** представлена функциональная модель суммирующего устройства СУ1 с последовательным выполнением микроопераций. Временные задержки блоков СУ1 выбраны из расчета их реализации на микросхемах среднего уровня интеграции [4, с. 124—186].

Результаты моделирования Verilog-описания функциональной модели устройства СУ1 в среде моделирования Active-HDL в 16-ричном коде представлены на временной диаграмме **рис. 3**. Устройство сраба-

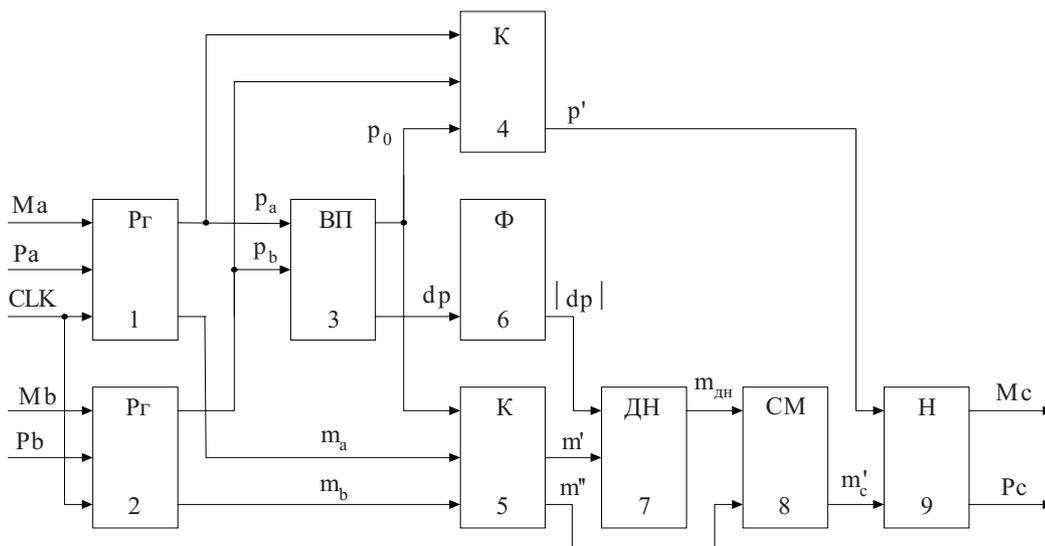


Рис. 2. Функциональная модель последовательного устройства СУ1:

Pr1, Pr2 — регистры 1, 2 слагаемых $A=m_a \cdot 2^{p_a}$, $B=m_b \cdot 2^{p_b}$, соответственно; К4, К5 — блоки коммутаторов 4, 5; ВП — блок вычитания порядков; Ф — блок формирователя модуля разности порядков (модуля выравнивающей разности); ДН — блок денормализации; СМ — блок сумматоров мантисс; Н — блок нормализации суммы чисел $C=m_c \cdot 2^{p_c}$; CLK — синхросигналы

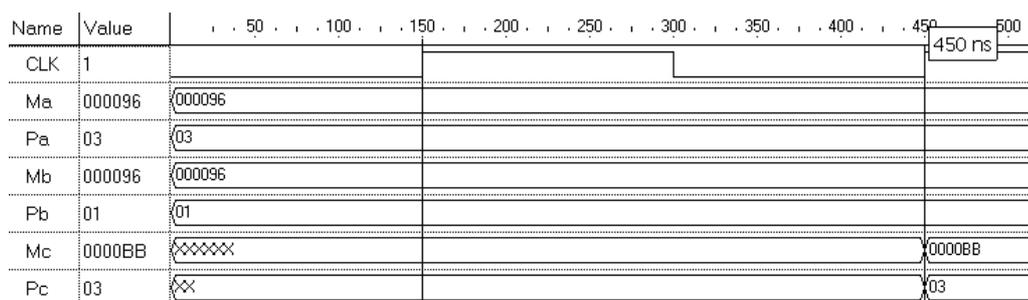


Рис. 3. Временная диаграмма работы последовательного устройства СУ1

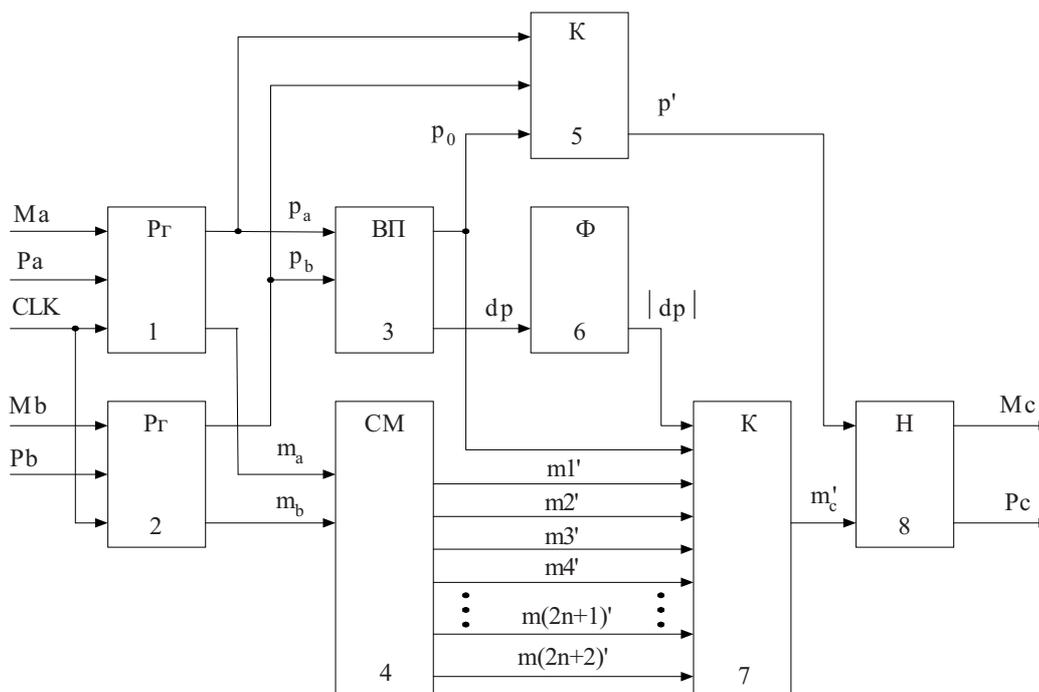


Рис. 4. Функциональная модель устройства СУ2 с параллельным выполнением микроопераций

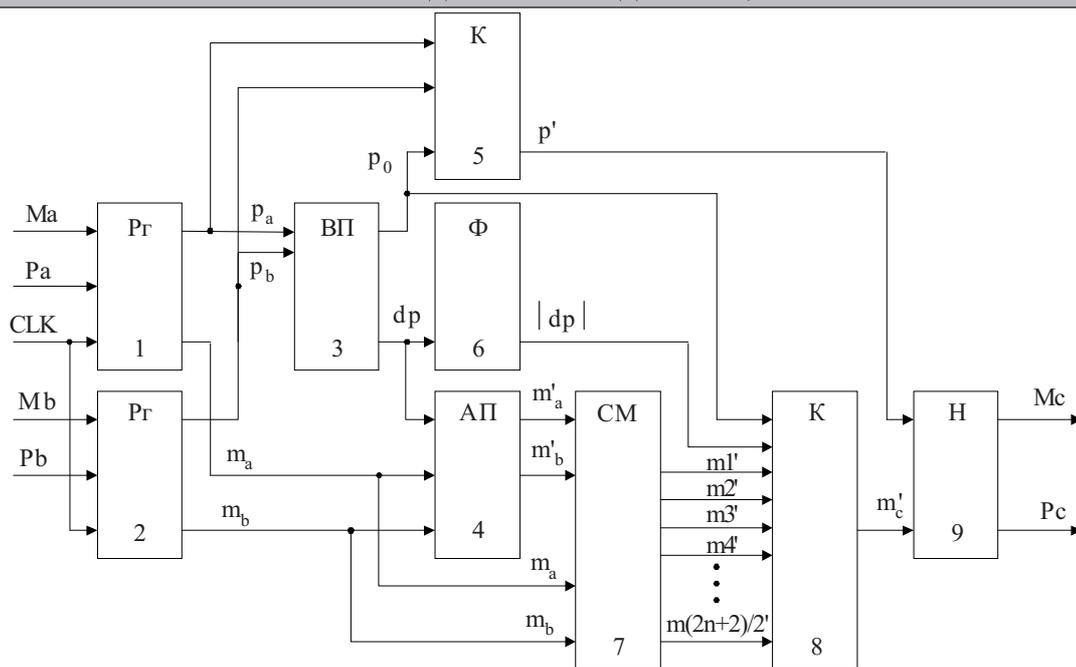


Рис. 7. Функциональная модель устройства СУ4

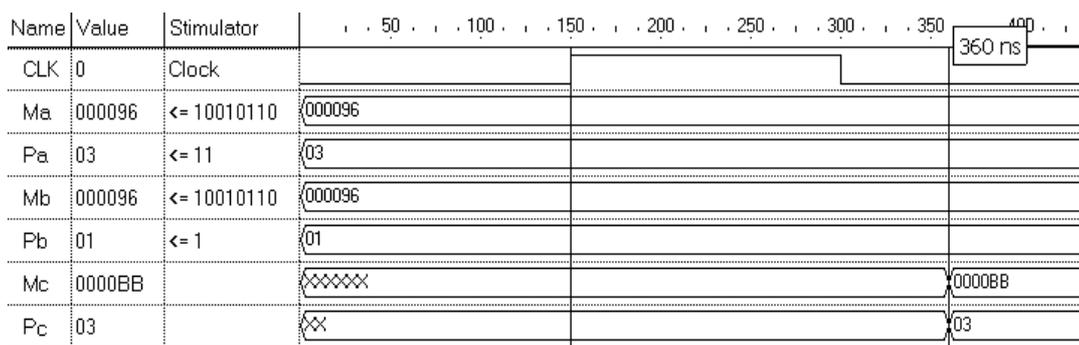


Рис. 8. Временная диаграмма работы устройства СУ4

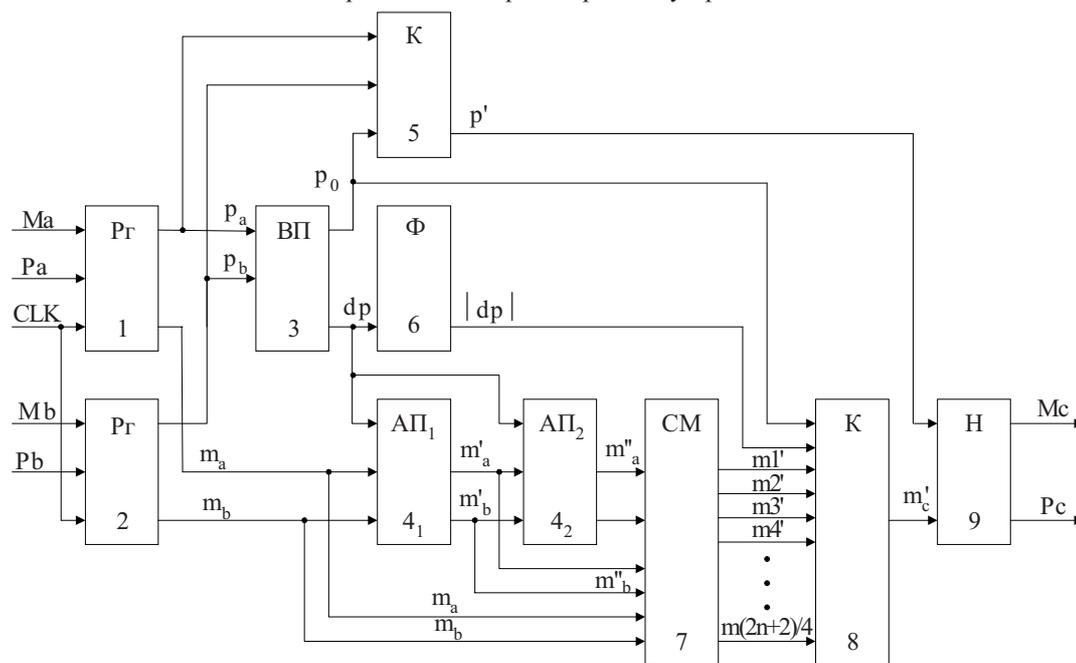


Рис. 9. Функциональная модель устройства СУ5 с предварительным анализом первого и второго младших разрядов выравнивающей разности

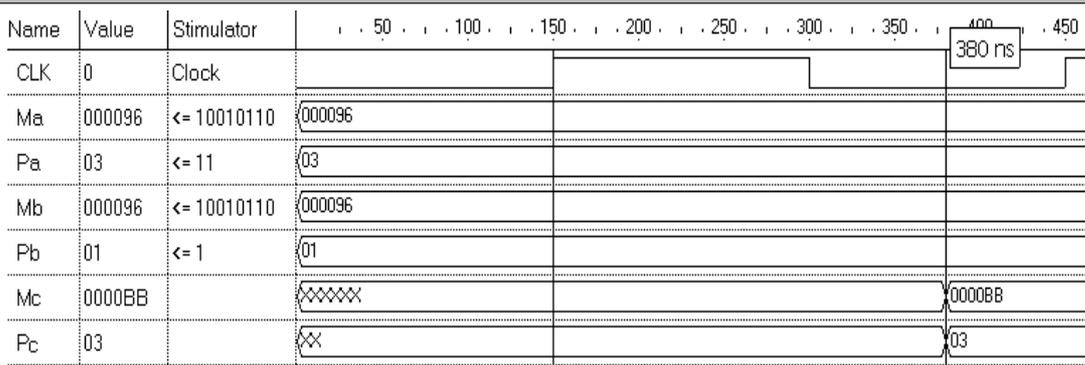


Рис. 10. Временная диаграмма работы устройства CY5

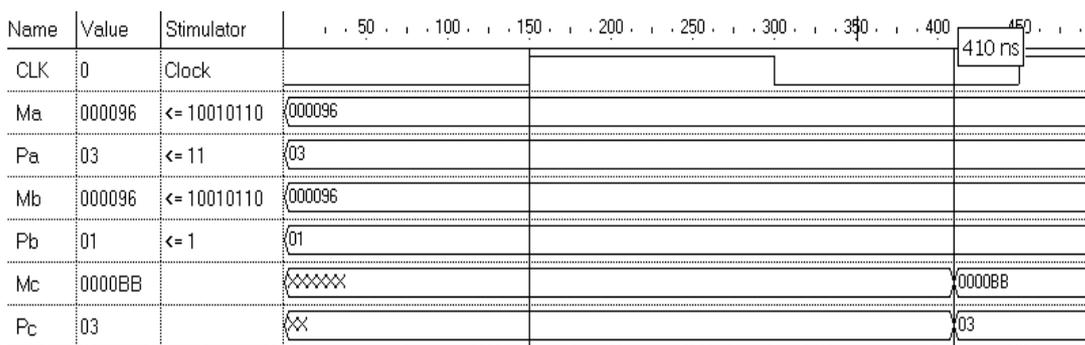


Рис. 11. Временная диаграмма работы устройства CY6 с предварительным анализом трех младших разрядов выравнивающей разности

чение второго младшего разряда ВР равно логической единице. В противном случае сдвиг не происходит, и $ma''=ma'$, $mb''=mb'$.

На блок подготовки частичных сумм (блок 7) подаются мантиссы ma , ma' , ma'' , mb , mb' , mb'' . Здесь подготавливаются $(2n+2)/4$ 2z-разрядные суммы мантисс ($z=n+3$). Затем в коммутационном блоке (блок 8) выбирается необходимая сумма мантисс исходя из значений знака и старших разрядов модуля ВР.

Результаты моделирования устройства CY5 в среде Active-HDL представлены на временной диаграмме рис. 10. Устройство срабатывает по переднему фронту синхронизирующего сигнала CLK. Из временной диаграммы следует, что на выходах устройства результат суммирования формируется по истечении 230 нс.

В функциональную модель устройства CY6 для анализа трех младших разрядов выравнивающей разности добавляется еще один анализирующий блок АП₃ между блоками АП₂ и СМ (см. рис. 9). Блоки предварительного анализа функционируют идентично. На входы третьего анализирующего блока АП₃ подаются мантиссы ma'' и mb'' . Здесь производится сдвиг мантисс ma'' и mb'' на 4 разряда относительно мантисс ma и mb , если третий младший разряд выравнивающей разности равен логической единице. В блоке подготовки частичных сумм подготавливаются суммы мантисс m_1' , m_2' , ..., $m_{(2n+2)/8}'$. В блоке коммутации выбирается необходимая сумма мантисс — аналогично CY5.

Результаты моделирования устройства CY6 в среде Active-HDL представлены на временной диаграмме рис. 11. Устройство срабатывает по пе-

реднему фронту синхронизирующего сигнала CLK. Из временной диаграммы следует, что на выходах устройства результат формируется по истечении 260 нс.

Для выработки рекомендаций по использованию рассмотренных выше суммирующих устройств их необходимо сравнить между собой не только по быстродействию, но также и по аппаратным затратам. Аппаратные затраты Q определяются по принципу Квайна, т. е. подсчитывается количество всех входов всех элементов схемы.

Пусть рассмотренные функциональные модели имеют разрядность 32, из них 24 разряда — мантиса числа, 8 разрядов — порядок числа. Тогда в про-

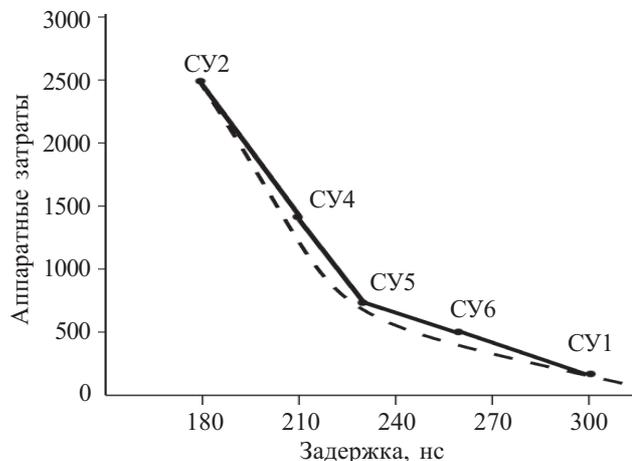


Рис. 12. Оценка качества сравниваемых суммирующих устройств

странстве критериев "задержка" — "аппаратные затраты" (рис. 12) они располагаются в соответствии с принципом оптимальности по Парето [7] (пунктирная кривая).

Анализ результатов моделирования показал, что СУ2 на ≈50% быстрее, чем СУ1. Но при этом аппаратные затраты у СУ2 возрастают почти на порядок в сравнении с СУ1. СУ4 дает выигрыш в быстродействии на ≈30%, при этом аппаратные затраты увеличиваются в сравнении с СУ1 в 5 раз. СУ5 дает выигрыш в быстродействии на ≈23%, аппаратные затраты увеличиваются в 3 раза. СУ6 дает выигрыш в быстродействии на ≈14%, аппаратные затраты увеличиваются в 2 раза по сравнению с СУ1.

В зависимости от разрядности порядков суммируемых чисел с плавающей запятой и с целью дальнейшего сокращения аппаратных затрат возможен предварительный анализ четырех, пяти и т. д. разрядов выравнивающей разности.

Таким образом, рассматриваемый в статье метод суммирования чисел с плавающей запятой позволяет сократить аппаратные затраты суммирующих устройств за счет уменьшения количества сумматоров целых чисел, используемых при подготовке частичных сумм. Но при этом быстродействие суммирующих устройств понижается.

Данные суммирующие устройства с требуемыми характеристиками могут быть реализованы на ПЛИС с помощью, например, системы автоматизированно-

го проектирования MAX+plus II, разработанной фирмой Altera. В данной САПР используются различные языки описания цифровых устройств — Verilog-HDL, VHDL, Altera HDL и др. Система автоматически просчитывает логическую емкость устройства и предлагает конкретную микросхему из заданного семейства микросхем, наиболее подходящую для реализации проектируемого устройства.

Практика показывает, что между оценками аппаратных затрат по Квайну и по занимаемой устройством площади кристалла есть соответствие.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Паулин О. Н., Шапо Ф. С., Синегуб Н. И. Модель сумматора с параллельным выполнением микроопераций // Технология и проектирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2005.— № 2.— С. 17—20.
2. ALDEC's EVITA InterActive-HDL Tutorial.— Aldec, Inc.: Henderson, NV 89014.
3. Кондратенко Ю. П., Мохор В. В., Сидоренко С. А. Verilog-HDL для моделирования и синтеза цифровых электронных схем.— Николаев: Изд-во НГТУ им. Петра Могилы, 2002.
4. Справочник по интегральным микросхемам / Под ред. Б. В. Тарабрина.— М.: Энергия, 1980.
5. Синегуб Н. И. Сумматоры чисел с плавающей запятой // Тр. Одес. политехн. ун-та.— 2004.— № 1.— С. 96—99.
6. А. с. 1833864 СССР. Устройство для суммирования чисел в дополнительном коде с плавающей запятой / А. В. Дрозд, О. Н. Паулин, Н. И. Синегуб.— 1993.— Бюл. № 30.
7. Потемкин И. С. Автоматизация синтеза функциональных схем (на примере сумматоров с групповым переносом).— М.: Энергоиздат, 1981.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Самарин О. Ф., Соловьев А. А., Шарова Т. В. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т.3. Вычислительные системы РЛС многофункциональных самолетов.— М.: Радиотехника, 2007.— 286 с.

Изложены принципы построения и особенности функционирования бортовых цифровых вычислительных систем (БЦВС), выполняющих функции обработки информации и управления в составе бортовых РЛС многофункциональных самолётов, и пути их совершенствования, отвечающие требованиям расширяющихся классов решаемых задач и ограничениям современных технологий, используемых при их разработке.

Для научных работников и инженеров, связанных с проектированием БРЛС и БЦВС. Может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам радиотехнических факультетов вузов.

НОВЫЕ КНИГИ



Бортовые интеллектуальные системы. Ч. 1. Авиационные системы.— М.: Радиотехника, 2006.— 104 с.

Изложены методы искусственного интеллекта применительно к бортовому авиационному комплексу, который функционирует в условиях реально складывающейся неопределенности и призван обеспечить комфортную работу летчика (экипажа) вне зависимости от текущей воздушной обстановки.

Для научных работников, аспирантов и студентов, занимающихся проблемами создания искусственного интеллекта.

Д. т. н. А. В. ПАЛАГИН, к. т. н. В. Н. ОПАНАСЕНКО,
А. Н. ЛИСОВЫЙ

Украина, г. Киев, Институт кибернетики им. В. М. Глушкова
E-mail: vlopanas@ukr.net

Дата поступления в редакцию
09.01 2007 г.

Оппонент к. т. н. В. Г. БРОВКОВ
(ОНПУ, г. Одесса)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ СИСТЕМ НА ПЛИС

Логико-информационный подход к проектированию ЭВМ модифицируется применительно к реконфигурируемым устройствам на ПЛИС, что позволяет определить оптимальное количество уровней иерархической системы.

Разработка и освоение серийного производства СБИС требует больших затрат как на разработку, так и на оборудование для их изготовления. В схемы, выполненные методом печатного монтажа, изменения довольно сложно, а в схемах, выполненных в виде БИС и СБИС, никакие заранее не предусмотренные изменения не возможны вообще. Это ограничивает не только возможности их специализации для конкретных применений, но и перспективы модернизации, расширения функций, внесения изменений в алгоритм функционирования. Поэтому одним из актуальных требований к современным устройствам вычислительной техники и систем управления является повышение их адаптируемости (гибкости).

Одним из путей реализации этих требований является создание устройств (систем, компонентов) с программируемой структурой.

Сегодня программируемые логические интегральные схемы — ПЛИС (Programmable Logic Devices — PLD) прочно вошли в практику современной компьютерной техники, заняв свою нишу прежде всего в качестве средства исследовательского проектирования и проблемной ориентации.

Широко известны работы [1] по организации реконфигурируемого компьютера, представленного двумя основными частями — постоянной (компьютер с жесткой структурой) и переменной (в виде набора вычислительных устройств), которые могут с помощью программы перестраивать свою структуру, а также работы [2] по формализованному проектированию процессоров с гибкой архитектурой. Они способствовали появлению нового направления в вычислительной технике по проектированию реконфигурируемых устройств (РУ) с гибкой (программируемой) архитектурой на базе ПЛИС — “Reconfigurable Computing” (что в общем случае обозначает двуединое понятие — как реконфигурируемой структуры компьютера (hardware), так и процесса обработки данных, выполняемого компьютером).

С появлением современных кристаллов ПЛИС [3] типа FPGA с большой логической емкостью (свыше 10 миллионов логических вентилях) стало возможным использовать полученные результаты для построения реконфигурируемых устройств и систем повышенной сложности на базе однородных сред с полностью программируемой архитектурой. При создании таких систем, которые должны обладать высокой надежностью и гибкостью приспособления к структуре решаемых задач, принцип реконфигурируемости структуры является определяющим. Из его реализации автоматически следует, в частности, возможность параллельного выполнения операций, естественно определяемого самой структурой алгоритма и реализуемого с помощью соответствующей настройки автомата. Применяя принцип реконфигурируемости, удается простым перепрограммированием структуры РУ настраивать его на эффективную реализацию заданного алгоритма, сохраняя функциональную универсальность устройства.

Определимся с понятиями. ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема, сочетающая регулярность структуры полупроводникового запоминающего устройства с универсальностью микропроцессора, позволяющая программно формировать внутренний специализированный процессор. Конфигурация — определенная совокупность аппаратных средств и соединений между ними, реализующая заданный алгоритм функционирования в течение определенного периода времени. Реконфигурируемость — свойство системы переопределять совокупность аппаратных средств и соединений между ними в соответствии с требуемым алгоритмом функционирования. Файл конфигурации — программный файл, сформированный посредством САПР для конкретного типа кристалла ПЛИС, предназначенный для создания требуемой конфигурации в кристалле ПЛИС.

Постановка задачи

Реконфигурируемая система состоит из постоянной F (или «фиксированной») части (Host-компьютера) и переменной V части — РУ, которые можно объединять в различные конфигурации. Архитектура реконфигурируемых систем зависит от мощности множества алгоритмов (N_F), выполняемых на оборудовании F , и от мощности множества алгоритмов (N_V), выполняемых на оборудовании V . Соотношение этих величин определяет предлагаемую классификацию реконфигурируемых вычислительных систем:

— вычислительные системы, ориентированные на Host-компьютер, в котором сосредоточены основные вычислительные мощности, а реконфигурируемый компьютер обеспечивает повышение производительности только для узкого класса задач ($N_F \rightarrow N, N_V \rightarrow 0, N_F \gg N_V$);

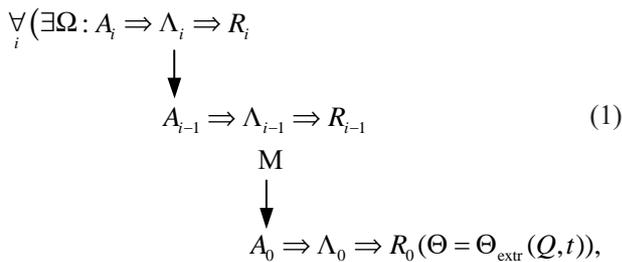
— реконфигурируемые вычислительные системы, ориентированные на РУ ($N_F \rightarrow 0, N_V \rightarrow N, N_V \gg N_F$), в которых Host-компьютер используется в основном только для выполнения вспомогательных функций (сервис, ввод-вывод), а все алгоритмы выполняются преимущественно на РУ, которое может иметь собственное поле внешних устройств (через платы расширения) или общее поле внешних устройств с Host-компьютером, к которым РУ имеет непосредственный доступ. РУ является автономным устройством в случае когда $N_F=0, N_V=N$, а Host-компьютер отсутствует;

— вычислительные системы, в которых Host-компьютер и РУ имеют приблизительно одинаковую сложность ($N_F \approx N_V$), при этом РУ ориентировано на решение трудоемких задач, а Host-компьютер обеспечивает мощную поддержку в части трансляции, ввода-вывода, сервиса и т. д.

Для определения оптимального количества уровней программируемых компонентов (в качестве которых будут использоваться ПЛИС) необходимо модифицировать известный *логико-информационный метод проектирования (ЛИМ)* [4], логическая концепция которого исходит из многоуровневой организации системы структурного программирования и представления процессора композицией операционного и управляющего автоматов. В соответствии с информационной концепцией процессор рассматривается как информационная система, вся информация в которой отнесена к трем «сферам» состояний: хранения, транспортировки и преобразования. Очевидно, что при определенных соотношениях между объектами информации в этих сферах можно получить оптимальные технические параметры ЭВМ. Оптимальной считается такая структурная реализация модели ЭВМ, для которой в соответствии с принятыми критериями найдены оптимальное количество уровней и оптимальные соотношения между обобщенными характеристиками компонент на каждом уровне, а также между соответствующими характеристиками компонент соседних уровней.

Методика проектирования реконфигурируемой системы

Сущность ЛИМ иллюстрируется схемой



где $A_i, \Lambda_i, R_i (i = \overline{1, N})$ — соответственно множества алгоритмов, операторов и их информационно-кодовые представления на i -м уровне программирования;

Θ — совокупность обобщенных характеристик.

Обобщенные характеристики формальной модели (1) легко пересчитываются в технические параметры ПЛИС, а также в информационные характеристики автоматных представлений каждого ($i = \overline{1, N}$) уровня иерархии программируемых автоматов. В [2, с. 135—136] предложена методика энтропийной оценки информационной сложности автомата через вероятности его переходов и состояний. Например, для построения матрицы вероятностей переходов определяется вероятность каждого перехода из состояния a_i в состояние $a_j (i, j = \overline{1, N})$:

$$p(a_j = \delta(a_i, x)) = p_{ij}. \quad (2)$$

Зная матрицу переходов $\|p_{ij}\| (i, j = \overline{1, N})$, матрицу вероятности $P_j (j = \overline{1, N})$ пребывания автомата в каждом ($i, j = \overline{1, N}$)-состоянии можно определить в результате решения системы линейных уравнений:

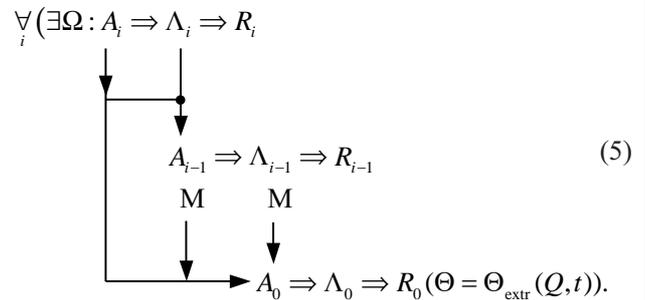
$$P_j = \sum_{i=1}^N P_i p_{ij}, \quad j = \overline{1, N}, \quad \sum_{i=1}^N P_i = 1. \quad (3)$$

Оценка суммарного объема оборудования автоматной композиции принимается пропорциональной сумме энтропийных оценок функций перехода и выхода, каждая из которых подсчитывается на основе известной формулы энтропии, определяющей среднюю длину i -го управляющего слова:

$$H_i = - \sum_{i=1}^N P_i \log_2 p_i. \quad (4)$$

В выражениях (2)—(4) за величину вероятности принимается частота i -го состояния.

Для формализованного представления модели реконфигурируемых устройств выполнена модификация метода ЛИМ, которая иллюстрируется следующей схемой:



В соответствии с (1) в данном случае R_i — множество аппаратных реализаций операторов i -го уровня. Причем при синтезе оптимальной структуры устройства некоторые уровни могут быть исключены. В схеме (5) для классических архитектур используются следующие уровни программирования: τ_0 — физический или «нулевой»; τ_1 — микропрограммный; τ_2 — программный; τ_3 — алгоритмический. Програм-

мирование на «нулевом» уровне определяет физическую структуру устройства, которая в конечном итоге реализует заданный алгоритм функционирования, т. е. выполняет программирование структуры устройства. В отличие от схемы (1), предложенная модификация (5) осуществляет не микропрограммную, а аппаратную реализацию алгоритмов на вентиляльном уровне.

Предложенная модель проектируемой вычислительной системы [5] представлена четверкой:

$$S = \langle M, A, B, D \rangle,$$

где M — множество математических методов для предметной области, лежащих в основе функционирования системы;

A — множество алгоритмов реализации метода;

$B = \{b\}$ — алфавит конструктивов, из которых синтезируется структура;

D — процедура описания проекта (описание объекта).

Таким образом, процесс проектирования состоит в решении задачи синтеза структуры на основе конструктивов $\{b\}$ алфавита B для выполнения определенного алгоритма A , реализующего метод M , лежащий в основе функционирования структуры, в соответствии с требованиями спецификаций. Результатом процедуры D является описание проекта во входном языке САПР.

Предложен синтез структурной реализации последовательности алгоритмов, когда метод/задача (M) представляется последовательностью алгоритмов ($A_i, \forall i = \overline{1, n}$):

$$M = \bigcup_i A_i.$$

В реконфигурируемых устройствах изначально задана базовая (нулевая) архитектура, реализованная на ПЛИС в виде функционального обрабатывающего поля фиксированной размерности, контроллера шины Host-компьютера, поля памяти, а также хорошо структурированной библиотеки файлов конфигураций (БФК) структурных реализаций методов (алгоритмов), выполняющих отображение алгоритма в структурную реализацию ($F: A_i \Rightarrow B_i$). Каждый алгоритм имеет отображение $F: A_i \Rightarrow B_i$ в структурную реализацию (B_i), которая представляет собой файл конфигурации для кристалла ПЛИС. В общем случае имеется несколько вариантов реализации алгоритма (например, последовательная, последовательно-параллельная и параллельная):

$$B_i = \bigcup_z B_{iz}, \quad (z = \overline{1, k}).$$

Каждый вариант характеризуется параметрами быстродействия (время выполнения — t_{iz}) и аппаратными затратами (q_{iz}). Причем предполагаем, что мощность множества B является достаточной для реализации широкого набора алгоритмов. В том случае, если требуемая реализация i -го алгоритма в библиотеке отсутствует ($B_i = \emptyset$), то необходимо с помощью инструментальных средств САПР ПЛИС создать ее и включить в качестве стандартного элемента в библиотеку. Таким образом, задача оптимизации сводится к упорядоченному назначению каждой i -й вершине графа реализуемого алгоритма (B_{iz})-го элемента библиотеки с целью получения экстремального значения

некоторого критерия качества. То есть любой оператор отображается только одним элементом из библиотеки. В результате определяется структура, реализующая заданный граф. Тогда решение задачи может быть получено методами целочисленного математического программирования.

Задача оптимизации состоит в определении минимума целевой функции, а критерием качества являются суммарное время выполнения всех алгоритмов и затраты оборудования:

$$\alpha \sum_i \sum_z t_{iz} x_{iz} + \beta \sum_i \sum_z q_{iz} x_{iz} = \min,$$

$$(\forall i = \overline{1, n}, \forall z = \overline{1, k})$$

при ограничениях

$$\sum_{z=1}^k x_{iz} = 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad z = \overline{1, k},$$

$$\sum_i \sum_z q_{iz} x_{iz} \leq Q_0, \quad \sum_i \sum_z t_{iz} x_{iz} \leq T_0,$$

где α, β — весовые коэффициенты, которые могут быть определены, например, методом экспертных оценок;

Q_0 — допустимые аппаратные затраты;

T_0 — допустимое время выполнения всех алгоритмов.

Методы решения таких задач достаточно хорошо разработаны и позволяют за допустимое время получить приемлемое решение [6].

Представленные выше модели и подходы положены в основу обобщенного алгоритма проектирования [7] реконфигурируемых устройств на ПЛИС (рис. 1), представляющих собой базовую плату (для сопроцессоров, подключаемых к стандартной шине Host-компьютера), несущую плату (для автономных устройств) с набором плат и модулей расширения или же кристалл ПЛИС (для реализации System-on-Chip).

Алгоритм представляет собой последовательность этапов: анализ проблемной области → постановка задачи → выбор подходящего алгоритма из БФК (синтез файла конфигурации для реализации алгоритма в случае его отсутствия с последующей записью в БФК) → отображение на уровне общей архитектуры (функциональная схема) → подготовка формализованного технического задания (ТЗ) → программирование структуры на основе файла конфигурации → программирование алгоритма → решение задачи → оценка характеристик параметров (структуры, процесса решения) → проверка параметров на соответствие установленным критериям (при необходимости следующая итерация) → ввод в эксплуатацию. Блок-схема на рис. 1 предусматривает также коррекцию критериев.

Разработанная методика проектирования, опираясь на лежащую в ее основе логико-информационную модель РУ, позволяет решить главную задачу проектирования — формализовать процесс поиска оптимальной пары «алгоритм — структурная реализация». Методика предназначена для проектирования проблемно-ориентированных сопроцессоров и автономных устройств, работающих с заданным набором алгоритмов; реконфигурируемых процессоров

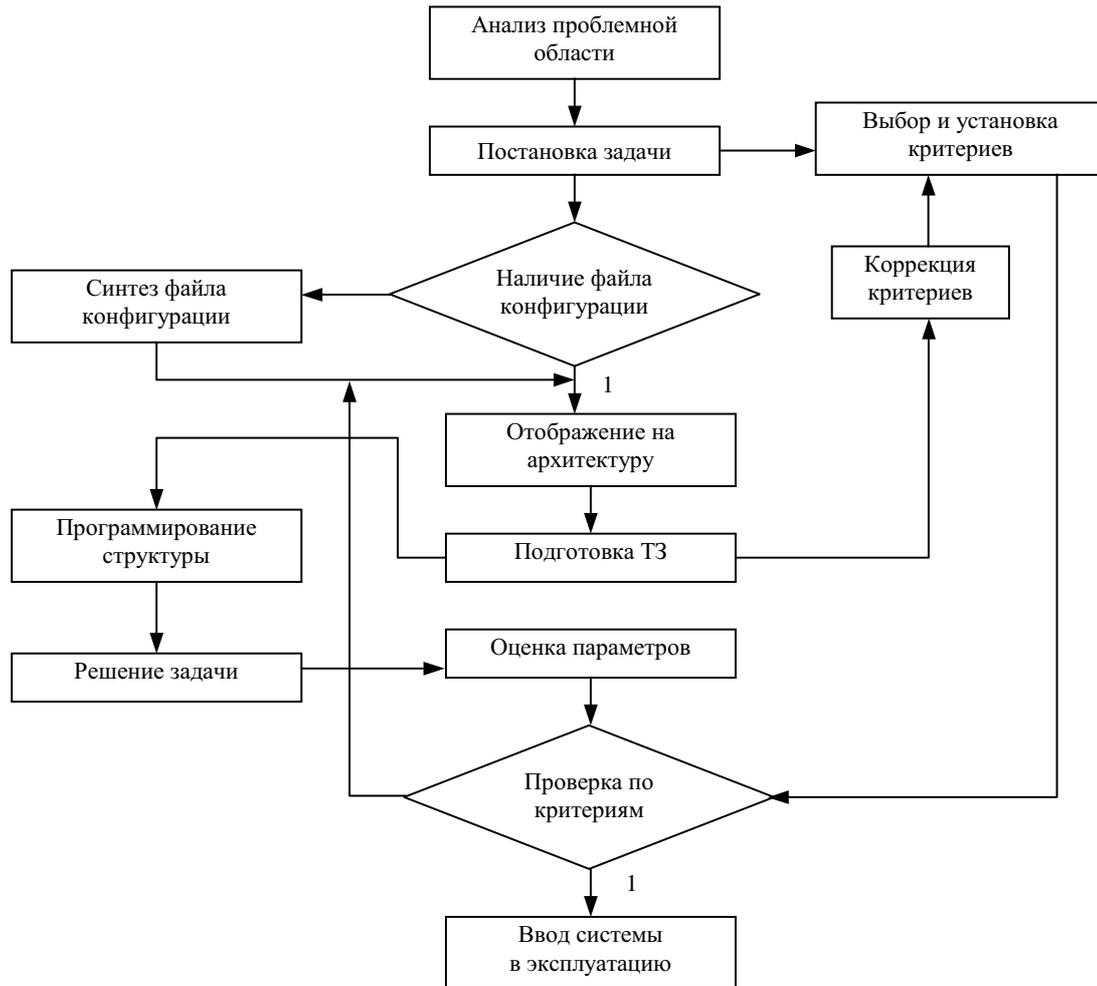


Рис. 1. Блок-схема алгоритма проектирования

с конвейерной обработкой данных; параметрических IP-Core для реализации заданных алгоритмов, которые представляются элементами библиотеки файлов конфигурации; System-on-Chip. Она может видоизменяться и развиваться в зависимости от исходного задания, класса задач, элементно-технологической базы и т. п.

Наиболее трудоемким и наименее формализованным является переход от анализа предметной области к постановке задачи, которая, в свою очередь, предполагает поиск подходящих математических методов ее решения и выбор оптимальных с использованием рассмотренной выше логико-информационной модели.

Проектирование реконфигурируемых проблемно-ориентированных устройств с аппаратной реализацией на базе кристаллов ПЛИС фирмы Xilinx в виде базовых библиотечных функциональных блоков посредством их описания на языке VHDL и схемотехнического редактора обеспечивает их использование широким кругом разработчиков цифровых устройств путем выбора оптимальной структуры (по критериям "быстродействие — сложность реализации").

На всех этапах проектирования выполняется верификация разрабатываемого устройства. Для реконфигурируемых систем необходимо в реальной среде с помощью тест-программ верифицировать проектируемое устройство. Для функционирования и верификации реконфигурируемого устройства в составе системы необходимо разработать драйвер этого устройства [8] и тест-программу для верификации всех компонентов системы.

Разработка тестов для верификации относится к прикладному программированию. В качестве среды для разработки программы используется среда Borland Studio 2006, компилятор языка Delphi. Выбор языка программирования Delphi обусловлен исключительно наличием мощных библиотек для работы с драйвером.

Пример проектирования

В качестве примера рассмотрим построение реконфигурируемой системы в виде программно-аппаратного комплекса на базе современных средств программирования, проектирования и верификации на основе реконфигурируемого устройства для реализации набора библиотечных функциональных блоков с плавающей точкой (соответствующих стандарту IEEE-754): сложения, умножения, деления и преобразования форматов представления чисел с плавающей точкой (ФПТ) в формат с фиксированной точкой (ФФТ) и обратного преобразования.

Аппаратный комплекс представляет собой реконфигурируемое устройство (плату ADS-XLX-SP3-EVL400 фирмы Avnet), подключаемое к Host-компью-

ютелю через шину PCI (что требует наличия на кристалле контроллера шины PCI). В файл конфигурации (проект) для программирования кристалла ПЛИС должны быть включены, помимо контроллера шины PCI, также функциональные блоки для реализации базовых арифметических операций.

Для верификации аппаратных блоков разработано программное обеспечение, основное окно графического интерфейса которого приведено на **рис. 2**.

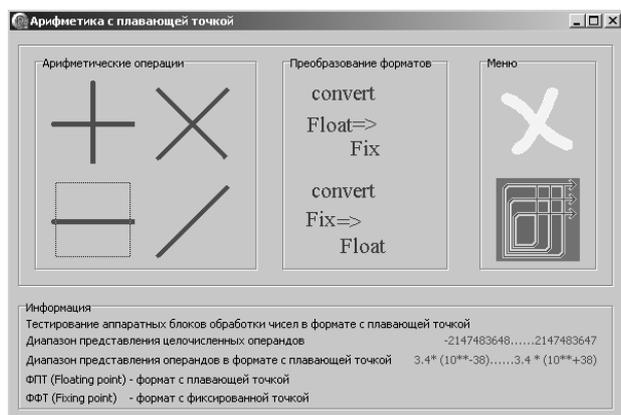


Рис. 2. Главное окно программы

По функциональному назначению операции разделяются на два типа: арифметические операции, операции преобразования форматов. Каждая из кнопок (+, -, /, и т. д.) при нажатии на нее клавиши "мышки" инициирует отображение окна соответствующей операции. Например при нажатии на кнопку «+» отображается окно, графический интерфейс которого для работы с операцией сложения чисел в ФПТ приведен на **рис. 3**.

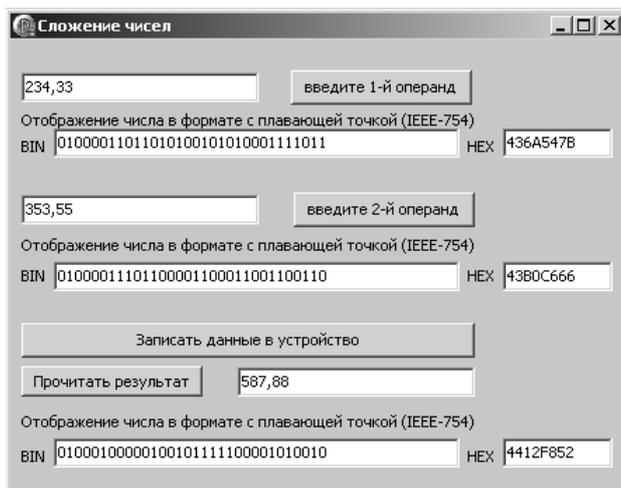


Рис. 3. Графический интерфейс модуля программы для операции сложения чисел

Обмен данными с устройством осуществляется по следующему алгоритму: в окна для ввода текста (параллельно кнопкам «введите 1-й операнд» и «введите 2-й операнд») заносятся операнды, которые входят в диапазон представления чисел стандарта IEEE-754; нажимаются вышеобозначенные кнопки, что приводит к формированию и отображению 32-разрядных

векторов (согласно стандарту IEEE-754) в двоичной и шестнадцатеричной форме; нажатие на кнопку «записать данные в устройство» инициирует передачу операндов и код операции сложения по шине в устройство, устройство обрабатывает операнды и записывает в ОЗУ операнд-результат; результат с ОЗУ читается и отображается в соответствующих текстовых окнах в нормальном виде и в формате в двоичном и шестнадцатеричном виде. Обмен данными с устройством для всех других операций происходит аналогично. На **рис. 4** отображен графический интерфейс окна для операции преобразования числа ФПТ в число ФФТ. Число в ФФТ состоит из первого левого бита — знака и остальных битов — модуля числа.

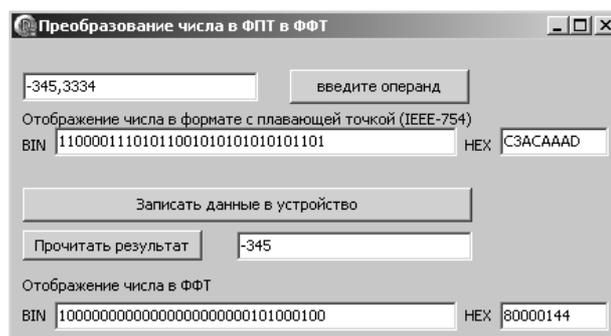


Рис. 4. Графический интерфейс модуля программы для операции преобразования форматов

Кроме функциональных секций, в программе имеется секция «Меню», которая имеет кнопку быстрого завершения работы и кнопку, открывающую информационное окно о продукте.

Разработанный проект включает (помимо устройства управления и контроллера шины PCI) следующие составные функциональные блоки с плавающей точкой: сложения, умножения, деления и преобразования форматов. Проект занимает 72% ресурсов кристалла ПЛИС типа Spartan 3 XC3S400 (2586 Slice из 3584 Slices, 4 из 16 умножителя 16x16) и характеризуется следующими частотными параметрами: сложение (вычитание) — конвейер с 5 ступенями (75 МГц); деление — конечный автомат с 6 состояниями (100 МГц); умножение — комбинационная схема (45 МГц); преобразование форматов (71 МГц).

Выводы

Разработаны принципы построения и функционирования нового класса устройств вычислительной техники и систем управления с реконфигурируемой архитектурой на базе кристаллов ПЛИС, архитектура которых отличается от традиционных архитектур фон-неймановского типа свойствами динамической реконфигурируемости, многоуровневости и параллельности обработки данных, что позволяет разработчику (пользователю) создавать функциональные средства вычислительной техники для произвольного алгоритма, обеспечивая при этом возможность адаптации в зависимости от выполняемой задачи (алгоритма).

Модифицирован известный логико-информационный подход к проектированию применительно к реконфигурируемым устройствам на ПЛИС, который

позволяет установить однозначное соответствие между объектами логико-информационной модели — алгоритмами, фрагментами алгоритмов и их информационно-кодowymi представлениями на всех уровнях иерархической системы, какой представляется проектируемое устройство.

Верификация разработанных блоков в реальной среде осуществляется с помощью программного комплекса, который включает в себя драйвер устройства, библиотеку функций для работы с драйвером, программу с модулями для верификации каждого блока в отдельности. При этом существенным достоинством программы является отображение векторов значения в форматах в двоичной и шестнадцатеричной форме, что позволяет использовать эти значения в системе моделирования ModelSim, которая отображает число с плавающей точкой только в виде вектора значения.

Верификация и тестирование разработанных функциональных блоков подтвердили корректную работу блоков, которые могут быть использованы любыми пользователями в своих проектах в виде готовых IP-Core.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Estrin G. Organization of computer system: the fixed plus variable structure computer // Proc. Western Joint Computer Conf.— 1960.— N 5.— P. 33—40.
2. Микропроцессорные системы обработки информации / А. В. Палагин, Е. Л. Денисенко, Р. И. Белицкий, В. И. Сигалов.— К.: Наук. думка, 1993.
3. Cosoroaba A., Rivoallon F. Achieving higher system performance with the virtex-5 family of FPGAs / Xilinx Inc., White Paper WP245 (v1.1), May 17, 2006 / Available at <http://www.xilinx.com>.
4. Палагин А. В. Перспективы развития и вопросы теории проектирования микропроцессоров и микроЭВМ // УСиМ.— 1982.— № 3.— С. 24—29.
5. Палагин А. В., Опанасенко В. Н. Реконфигурируемые вычислительные системы.— К.: Просвіта, 2006.
6. Сергиенко И. В., Шило В. П. Задачи дискретной оптимизации. Проблемы, методы решения, исследования.— К.: Наук. думка, 2003.
7. Палагин А. В., Опанасенко В. Н., Лисовый А. Н. Проектирование реконфигурируемых систем на ПЛИС / Тр. Науч.-практ. конф. «СИЭТ-2006». Т. 1.— Одесса.— 2006.— С. 164.
8. Солдатов В. П. Программирование драйверов Windows.— М.: ООО «Бином-Пресс», 2004.

Д. т. н. В. Л. КОСТЕНКО, С. О. ЖАРОВЦЕВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: staz@normaplus.com

Дата поступления в редакцию
06.10 2006 г. — 14.02 2007 г.

Оппонент А. И. РАДКЕВИЧ
(НИИ микроприборов, г. Киев)

МНОГОКАНАЛЬНОЕ ВЫСОКОТОЧНОЕ УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ НЕЙРОЧИПОМ

Предложено многоканальное высокоточное устройство управления нейрочипом, позволяющее минимизировать погрешность при формировании значений весовых коэффициентов синапсов и расширить диапазон их рабочих значений.

Современные нейрочипы строятся на основе сложных многонейронных сетей, использующих комбинированную технологию, основанную на применении в одном нейрочипе цифровых и аналоговых схем [1], в состав которых входят нейроны, матрица связей, схемы обучения и восстановления, АЦП и ЦАП. В настоящее время для универсализации нейрочипов и повышения гибкости их нейросетей используют синапсы, обеспечивающие значения весовых коэффициентов в широком диапазоне. Поэтому минимальная погрешность, внесенная в значение весового коэффициента при его формировании, приведет к значительному снижению точности вычислений. Следовательно, актуальными представляются исследования возможности минимизации погрешности при формировании значений весовых коэффициентов синапсов.

Необходимо учитывать также, что при разработке нейрочипа задачу повышения производительности нельзя отрывать от задачи снижения погрешности

преобразования и точности задания значений весовых коэффициентов.

Известно, что для миниатюризации нейрочипа применяются внешние устройства управления [1]. Такие устройства позволяют не только задавать и восстанавливать значения весовых коэффициентов, но и обучать нейросеть. Однако применение таких устройств для управления матрицей синапсов нейросетей ограничено быстродействием выходного элемента.

Известны устройства формирования временных интервалов коммутационного типа, позволяющие уменьшить паразитную задержку, возникающую в тракте преобразования при формировании среза задающего импульса [2, 3].

Задача исследований состояла в минимизации погрешности значений весовых коэффициентов за счет оптимизации выходных элементов, согласования выходного сигнала с входами нейрочипа, снижения временной задержки при формировании среза задающих импульсов.

На основе анализа принципов построения известного многоканального формирователя задающих импульсов нами установлено, что минимум паразитной временной задержки, которая определяется суммой переходных процессов последовательно соединенных электронных блоков в тракте преобразования, достигается за счет включения двухступенчатой памяти на базе Т-триггера и Д-триггера с динамическим син-

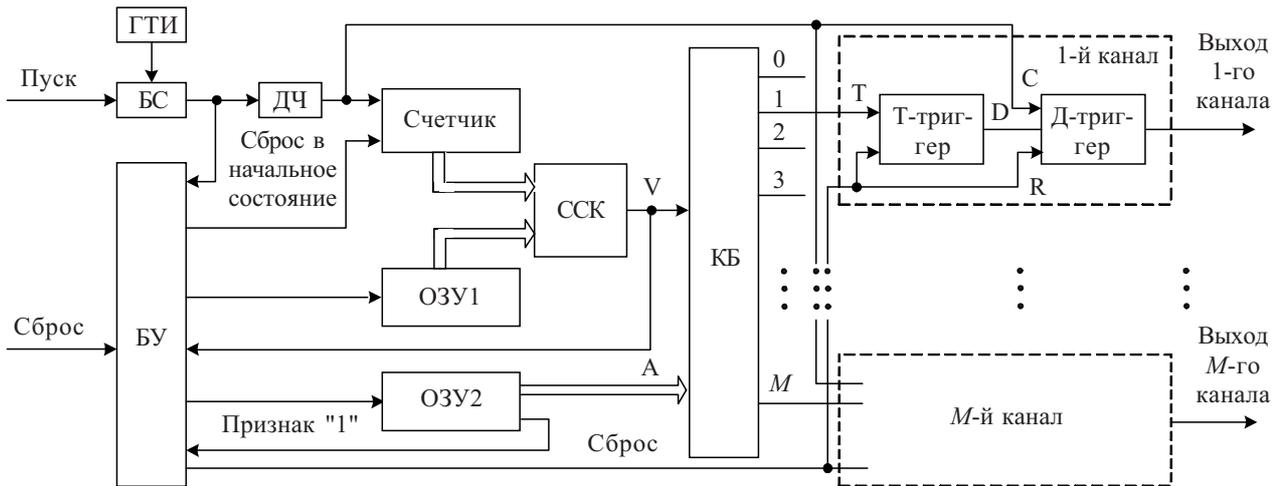


Рис. 1. Структурная схема многоканального высокоточного устройства формирования задающих импульсов

хровходом на каждый выход коммутатора [2]. Поэтому величина задержки значительно зависит от метрологических характеристик последнего элемента. Нами для дальнейшего повышения точности формирования в качестве выходного элемента предложен Д-триггер с потенциальным синхровходом (рис. 1), что позволило не менее чем в 2 раза снизить паразитную задержку.

Структурная схема предложенного многоканального формирователя состоит из кварцевого генератора тактовых импульсов (ГТИ), блока синхронизации (БС), делителя частоты (ДЧ), двоичного счетчика, адресных оперативных запоминающих устройств (ОЗУ1, ОЗУ2), блока управления (БУ), схемы сравнения двоичных кодов времени (ССК), коммутирующего блока (КБ), M каналов формирования фронтов задающих импульсов.

Отличительной особенностью схемы в сравнении с известными схемами линейных многоканальных формирователей коммутаторного типа является алгоритм его функционирования, а также включение двухступенчатой памяти на каждый выход коммутатора. Временные диаграммы работы приведены на рис. 2. Двухступенчатая память состоит из двух последовательно включенных Т- и Д-триггеров с потенциальным синхровходом. При этом синхровходы Д-триггеров объединены и включены в цепь "выход делителя частоты — вход счетчика".

Формирователь задающих импульсов выполнен на основе метода суммирования единичных временных приращений [2], при котором уменьшение динамической погрешности достигается преобразованием кода во фронт задающего импульса в два этапа, но за один такт работы ГТИ. На первом этапе формируется фронт задающего импульса, соответствующий коду, уменьшенному на единицу, с запоминанием этого фронта в первых триггерах двухступенчатой памяти заданных каналов. На втором этапе происходит перезапись информации из первых триггеров во вторые триггеры фронтом импульса ГТИ с одновременным формированием фронта временного интервала на выходах формирователя, отвечающего заданному коду. Сигналами установки в "1" и "Сброс" обеспе-

чивается соответственно установка в "единицу" всех триггеров суммирующего счетчика и сброс в "0" элементов всех каналов. В ОЗУ1 записываются двоичные коды длины импульсов в порядке возрастания, исключая код числа "нуль". В ОЗУ2 записываются группы двоичных кодов номеров каналов, причем коды в группе записываются в произвольном порядке, а последнему коду группы присваивается признак "1". При этом кварцевый ГТИ формирует непрерывную последовательность прямоугольных импульсов эталонной частоты.

Так как ОЗУ1 и ОЗУ2 разобщены в пространстве, то при записи информации в них группы кодов номеров каналов ставятся в однозначное соответствие кодам длин импульсов. Причем алгоритм работы цифрового устройства сравнения кодов неординарен и отличается от алгоритма работы классического ССК.

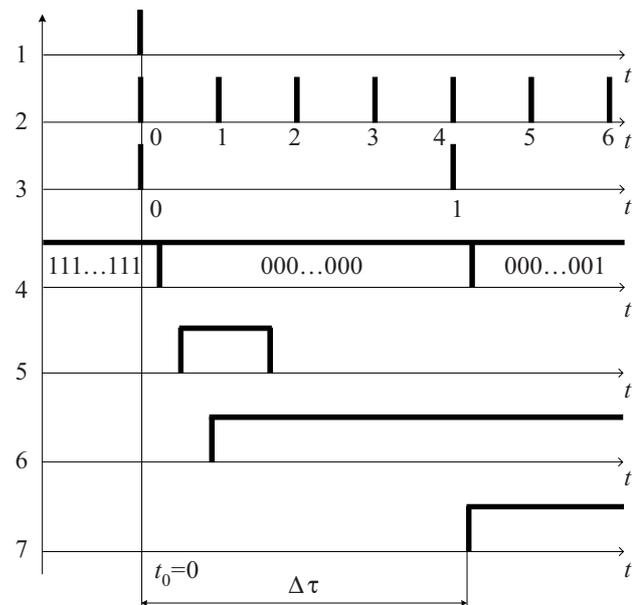


Рис. 2. Временные диаграммы работы устройства управления нейрочипом:

1 — Пуск; 2 — выход ГТИ; 3 — выход ДЧ; 4 — двоичный код на выходе счетчика; 5 — выход ССК; 6 — выход Т-триггера; 7 — выход Д-триггера; $\Delta\tau$ — временная задержка тракта преобразования

Суть его работы сводится к следующему. Поступающий на вторые входы ССК программный код длины импульса уменьшается на единицу. Этот код сравнивается с соответствующим по величине кодом реальной длины импульса, сформированным счетчиком. В момент равенства кодов на обоих входах ССК на его выходе происходит смена потенциала, т. е. фиксируется результат сравнения; последний удерживается до момента изменения величины обоих или одного из кодов.

Как видно из рис. 2, момент начала работы многоканального высокоточного устройства формирования задающих импульсов определен моментом поступления сигнала “Пуск”. Происходит сравнение кодов, при этом сигналом “Сравнение”, полученным на выходе ССК, обеспечивается последовательное считывание обоих кодов номеров каналов первой группы с дальнейшим их распределением посредством блока коммутации и запоминанием в первых Т-триггерах двухступенчатой памяти каналов. То есть на предшествующем такте ДЧ обеспечивается предварительное преобразование и запоминание программного кода длины импульса, уменьшенного на единицу блоком ССК. С последующим импульсом ДЧ, отвечающим программному выходному коду длины импульса, происходит формирование фронтов задающих импульсов одновременно на всех выходах. Также следует отметить, что импульс ДЧ одновременно является и информационным по отношению к программному коду длины импульса и по отношению к Д-триггерам каналов. Коэффициент деления ДЧ выбирается следующим образом: если по максимуму, то он равен числу каналов устройства, если по минимуму, то коэффициент равен максимальному числу каналов, в которые одновременно (синхронно) планировалось бы формирование одного двоичного кода длины импульса.

В разработанном устройстве синхровходы триггеров второй ступени памяти каналов тракта формирования фронта задающего импульса объединяются и подключаются к суммирующему входу счетчика. Счетчик преобразует входной код в реальные параллельные позиционные двоичные коды длин импульсов. При этом стабильность фронта задающего импульса на выходе формирователя определена, в первую очередь, стабильностью выходных параметров синхронизируемой второй ступени памяти тракта формирования фронта задающего импульса. Одновременно на его синхровход поступает фронт высокостабильного импульса кварцевого ГТИ, выполняющего роль эталона времени. В аппаратных трактах формирования фронта задающего импульса в качестве первой ступени памяти выступает Т-триггер, а в качестве второй — Д-триггер с потенциальным синхровходом.

Признак «1» через блок управления, во-первых, останавливает чтение информации из ОЗУ2, а во-вторых, позволяет считывать очередной программный код времени из ОЗУ1, при этом, естественно, анализируется сигнал сравнения на выходе ССК. Такой алгоритм преобразования программных кодов во фронт

ты задающих импульсов на протяжении цикла преобразования остается неизменным. Максимальное время цикла преобразования определяется количеством кодовых комбинаций счетчика и, естественно, не должно быть меньше количества программных кодов длин импульсов, предварительно записанных в ОЗУ1.

Необходимо отметить, что уменьшение Δt_i в формирователях адекватно достижению цели по повышению точности преобразования, т. е. снижению потерь информации в процессе преобразования.

Был построен макет на микросхемах серии К555. Получен результат снижения временной задержки на 8—10 нс (рис. 3). Для снижения массогабаритных показателей в качестве Т- и Д-триггеров был применен JK-триггер. Исследована также возможность изготовления этого устройства на основе многоразрядных регистров с защелкиванием информации и разрешением выхода. Соответствующее уменьшение временной задержки наблюдалось и при использовании более быстродействующей элементной базы. Перечень элементов макета устройства на 32 канала приведен в таблице.

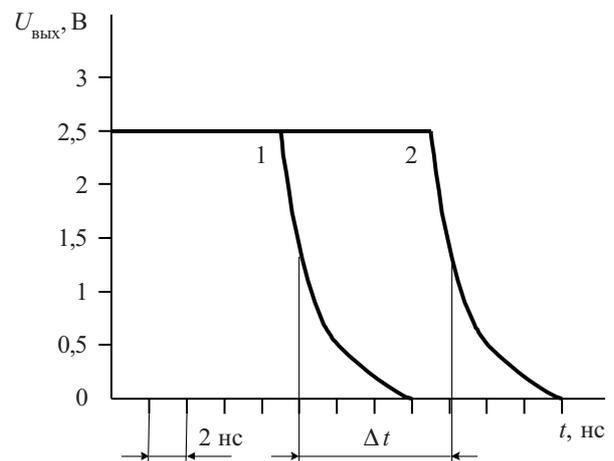


Рис. 3. Срезы сформированных импульсов: 1 — с двухступенчатой памятью; 2 — без двухступенчатой памяти

Перечень элементов

Наименование элемента	Количество элементов, шт.
Микросхема К555ЛН1	4
Микросхема К555РУ2	2
Микросхема К555ИЕ7	2
Микросхема К555ИЕ6	1
Микросхема КР531ТВ9	32
Микросхема К555ИМ3	2
Микросхема К555ЛЛ1	32
Микросхема К555ЛИ1	16
Резистор МЛТ-1-1,2 кОм	2
Резистор МЛТ-1-1,2 кОм	32
Конденсатор КМ-56-0,1 мкФ	32
Конденсатор КМ-56-510 пкФ	2
Конденсатор К53-100 мкФ	2

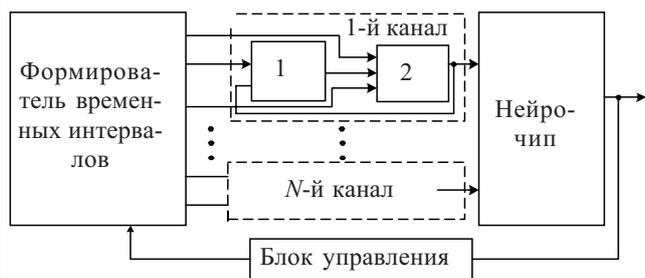


Рис. 4. Функциональная схема устройства управления нейрочипом:
1 — Т-триггер; 2 — Д-триггер

Значительный интерес представляет также использование вместо микросхем серии К555 быстродействующих ПЛИС. Это позволит уменьшить время задержки и габариты исследуемого устройства.

Компьютерное моделирование, проведенное в программном пакете OrCAD Capture, также подтвердило, что устройство управления матрицей синапсов нейрочипа с предложенными нами выходными цифровыми блоками уменьшает временную задержку при формировании среза задающего импульса в 1,5—2 раза по сравнению с известными схемами [2].

На рис. 4 представлена функциональная схема подключения разработанного устройства к управляемому нейрочипу, из которой видно, что блок управления по результатам вычислений нейрочипа задает новое значение весовых коэффициентов синапсов через разработанный формирователь импульсов.

Выводы

Разработанное устройство управления нейрочипом позволяет устранить временные задержки, возникающие в процессе преобразования цифрового кода во фронт задающего импульса синхронно на выходах ряда определенных каналов. Устранение погрешности (по причине уменьшения временной задержки) и расширение функциональных возможностей разработанного устройства осуществляется за счет структурной схемы сравнения.

Использование разработанного многоканального высокоточного формирователя уменьшает время задержки, что позволяет снизить — по сравнению с классическими формирователями — инструментальную динамическую погрешность в 1,5—2 раза при формировании задающего импульса по одному или одновременно по ряду каналов.

К достоинствам описанного технического решения относится также то, что предложенный подход позволяет наиболее эффективным способом наращивать вычислительные возможности нейрочипа, тем самым увеличивая количество и сложность решаемых задач.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ.

1. Галушкин А. И. Нейрокомпьютеры. Кн. 3. (Нейрокомпьютеры и их применение).— М.: ИПРЖР, 2000.
2. Гитис Э. И., Пискулов Е. А. Аналогово-цифровые преобразователи.— М.: Энергоиздат, 1981.
3. Николенко И. Н. Многоканальный формирователь временных интервалов высокой точности // Тр. Одес. политехн. ун-та.— 1999.— Вып. 2 (8).— С. 150—153.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Медведев А. Печатные платы. Конструкции и материалы.— М.: Техносфера, 2005.— 304 с.

Электроника — наиболее быстро развивающаяся область науки и техники, одно поколение сменяет другое каждые три-пять лет. Меняются и технологии печатных плат, сборки и монтажа компонентов, составляющих основу печатного монтажа. Базовые технологии печатных плат обрастают новыми приемами и операциями, расширяются их возможности за счет использования прецизионного оборудования, более качественных материалов.

В книге описаны схемы процессов, системы совмещений, технологии формирования топологического рисунка.

Монография предназначена как для технологов, работающих на производстве печатных плат, так и для конструкторов. Положительно скажется ее прочтение и на уровне управления производством. Преподаватели технических университетов и колледжей могут рекомендовать ее в качестве учебного пособия по курсу “Конструирование и технология производства электронной аппаратуры”.



в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

➤ «Электронный нос», основанный на матрице элементарных полупроводниковых сенсоров резистивного типа. (Россия, г. Москва, Фрязино)



➤ Синтез ферромагнитных оксидов с высоким уровнем удельной электропроводности. (Украина, г. Одесса)

➤ Строение и высокотемпературная сверхпроводимость пленок $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$. (Россия, г. Москва)

➤ Дифракционная составляющая глубины резко изображаемого пространства в оптическом микроскопе. (Украина, г. Киев)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции

В. В. ДЕМЕХИН, д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ

Украина, Донецкий национальный университет
E-mail: dats@mail.donbass.com

Дата поступления в редакцию
05.04—18.12 2006 г.

Оппонент д. т. н. С. Г. АНТОЩУК
(ОНПУ, г. Одесса)

РАСПОЗНАВАНИЕ ЗРИТЕЛЬНЫХ ОБРАЗОВ НА ОСНОВЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Разработаны метод и устройство классификации изображений, позволяющие определять принадлежность зрительных образов к тому или иному классу.

От того, насколько эффективно решается задача соотнесения входного сигнала с некоторой предопределенной категорией (классом), зависит производительность систем искусственного интеллекта, предназначенных для классификации образов (pattern classification). Наиболее успешно эта задача решается сегодня на основе искусственных многослойных нейронных сетей (НС). Классифицирующие возможности однослойных НС при этом ограничены двумя классами, независимо от вида нелинейности синаптических нейронных связей [1].

В настоящей работе предлагается топологический метод соотнесения входного сигнала (изображения) с некоторым предопределенным классом (образом). На его основе решается задача повышения производительности распознающей системы (РС) по отношению к РС на основе НС, а именно, повышение скорости распознавания образов и скорости обучения. К преимуществам топологического метода также относятся расширение классифицирующих возможностей однослойных РС, повышение производительности РС при использовании одновременного обучения и обработки по N спектральным каналам, возможность сочетания традиционной (основанной на алгебраическом суммировании весов) и топологической обработки в одной конструкции РС.

Принцип топологической обработки информации (монохроматический вариант)

Суть метода топологической (другое название — дислокационной) обработки информации заключается в автоматическом изменении топологии связей между светочувствительными рецепторами (сенсорами) и ассоциативными элементами (A -элементами). Изменение топологии осуществляется на основе поиска распределения отражающих (пропускающих) состояний матрицы ассоциативных элементов (АМ), приводящего к правильному соотнесению входного сигнала и предопределенного класса. Процесс поиска осуществляется на основе обучающей выборки.

Отметим, что изменение топологии синаптических связей присуще также процессам обработки информации искусственными НС и человеческим голов-

ным мозгом (нейроны в человеческом мозге постоянно отмирают, а новые синаптические связи создаются). Роль перестройки связей в искусственных НС связана с коррекцией весовых коэффициентов и, как будет показано ниже, принципиально отличается от той роли, которую она играет в топологическом методе.

На рис. 1 дана схема простейшей однослойной конструкции РС, предназначенной для классификации изображений топологическим методом. Здесь световое табло сенсоров обозначено ИМ — информационная матрица. Полное число рецепторов S_i этой матрицы равно L ($i=1, 2, 3, \dots, L$). Величина L зависит от требуемого аппаратного разрешения ИМ, т. е. от того, насколько точно точечное изображение должно совпадать с исходным (непрерывным) при дискретизации изображения. В первых (не топологических) РС количество рецепторов L было порядка нескольких сотен.

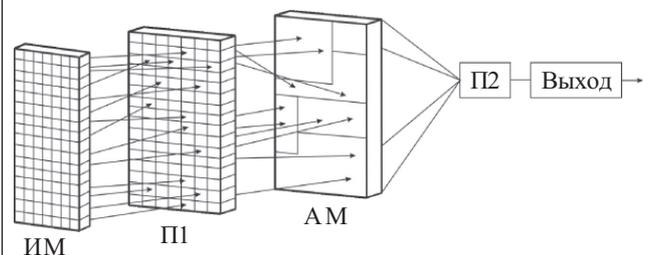


Рис. 1. Структура монохроматической распознающей системы

Пороговое устройство ПП предназначено для ограничения числа каналов между ИМ и АМ, которое не должно превышать некоего значения k . (Значения, которые может принимать k , определены ниже.) Отметим, что пороговое устройство ПП может быть исключено из схемы, если стохастические связи между ИМ и АМ смонтировать таким образом, что количество связей η будет лежать в интервале от $k/2$ до k для всех изображений. Число A -элементов A_j матрицы ассоциативных элементов равно m ($j=1, 2, 3, \dots, m$). П2 — логический элемент “И” с $k/2$ входами. Если между ИМ и АМ используются синаптические связи, то роль логического элемента “И” может исполнять двухслойная НС. Если используются оптические связи, то эту логическую операцию выполняет оптический логический элемент “И”.

В монохроматическом варианте РС стохастические связи между ИМ и АМ могут быть как гальвани-

ческие (провода, случайным образом соединяющие рецепторы S_i и A -элементы A_j), так и оптические (оптоволоконные или через открытое пространство). В случае гальванических или оптоволоконных связей поворот ИМ относительно АМ не влияет на работу РС. В "многоцветном" варианте РС используются связи через открытое пространство. В этом случае поворот ИМ не должен приводить к перемещению световых лучей за пределы тех A -элементов, в которых они были дислоцированы изначально. На ИМ проецируются статические двухмерные изображения, образованные оптическим излучением очень узкой спектральной области так, что его можно считать монохроматическим. В зависимости от распределения освещенности ИМ одни рецепторы окажутся возбужденными, а другие останутся невозбужденными.

Пусть функция яркости $D(x, y)$ таких изображений принимает всего два значения — "1" и "0". Помехи и шумы, маскирующие изображения и искажающие их форму, частично устраняются при предварительной обработке изображений. Их влияние на процессы обучения РС и распознавания учитываются также при коррекции внутренних параметров РС. При предъявлении на вход РС изображений, которые не были показаны при обучении, требуется, чтобы их отличие от правильно классифицированных примеров было минимальным.

Обозначим распознаваемые образы как B и C . Задача сводится к тому, чтобы независимо от формата представления изображений (независимо от их масштаба, толщины линий, формы и т. д.) РС реагировала выходным сигналом "+1" на один образ (например, B), а на другой (C) — сигналом "0".

При проецировании на ИМ некоторого изображения сигнал от возбужденных рецепторов через пороговое устройство П1 поступает на матрицу ассоциативных элементов, занимая на ней определенные позиции (адреса). Порог П1 пропускает сигналы не более чем по k каналам, уровень сигнала в которых выше порогового.

Определение числа $C_{mk}^r(r)$ способов размещения k каналов в m различных A -элементах с заданным числом r "пустых" A -элементов — одна из классических комбинаторных задач [2, с. 514]:

$$C_{mk}^r(r) = C_m^r \Delta^{m-r} O^k, \quad (1)$$

$$\text{где } \Delta^s O^k = \sum_{j=0}^s (-1)^j C_s^j (s-j)^k.$$

Например, при $m=10, k=4$ $C_{10,4}(6)=5040$, а при $m=12, k=4$ $C_{12,4}(8)=115020$.

В монохроматическом варианте каждый A -элемент имеет два состояния: отражает свет (дает сигнал 1) и не отражает свет (дает сигнал 0). Если A -элементы работают на пропускание, как показано на рис. 1, то двум состояниям A -элементов в этом случае будут соответствовать: A -элемент пропускает свет (сигнал "1") и не пропускает свет (сигнал "0").

Таким образом, случайное распределение интенсивности светового потока, образованного изображением, заменяется случайным распределением это-

го потока по η A -элементам ($k/2 \leq \eta \leq k$). Каждому изображению, поданному на вход РС, однозначно соответствует определенная топология связей, определенный способ их размещения (дислокация) на поверхности АМ. При изменении топологии связей происходит соответствующее изменение дислокации этих связей.

Если не учитывать весовых коэффициентов связей (не учитывать различий по величине сигналов в разных каналах), то перестановки связей типа 135, 351, 513 и т. д. не различимы для РС. В этом случае максимальное число различных изображений $p = C_m^r$. То есть происходит преобразование распределения освещенности $D(x, y)$ в стохастическое распределение равных по величине сигнала каналов по адресам АМ.

Для корректного отнесения множества изображений (множества входных векторов $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$) к одному из двух классов B и C изменение дислокаций отражающих (пропускающих) состояний, осуществляемых при обучении, должно быть таково, что при всех изображениях B на логический элемент «И» поступают сигналы от $>k/2$ A -элементов, а при всех изображениях C — от $\leq k/2$ A -элементов. В первом случае логический элемент даст на выходе сигнал "1", а во втором — "0".

Подчеркнем проявляющееся здесь существенное отличие топологических РС от однослойных НС, заключающееся в своеобразии порога, определяющего процедуру классификации. В топологическом методе порог не энергетический, а количественный. Отнесение входного вектора к B или C определяется количеством сигналов, а не их алгебраической суммой. В этом имеются определенные преимущества, позволяющие, в частности, преодолеть однослойными системами проблему линейной разделимости функций.

РС с l двоичными входами может иметь 2^l различных входных образов. Следовательно, чтобы РС могла распознавать все эти образы, требуется выполнение условия $C_m^r \geq 2^l$. Максимальное количество A -элементов (максимальное m) и соответствующее ему значение k зависят от количества тестируемых изображений и от числа l .

Проиллюстрируем работу топологического метода на простом примере.

Пусть АМ состоит всего из десяти A -элементов ($m=10$), а максимальное число каналов, по которым распространяются сигналы от изображений, равно четырем — $k=4$ (рис. 2).

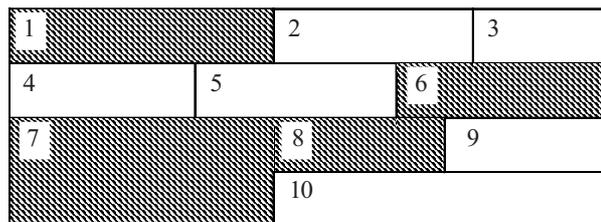


Рис. 2. Распределение единичных состояний по адресам матрицы ассоциативных элементов (заштрихованные ячейки)

Здесь задано некоторое произвольное распределение по АМ отражающих (пропускающих) A -элементов, которые в случае попадания на них сигнала изображения дают на вход логического элемента “И” сигнал “1”. Критерием отнесения тестируемых изображений к образу B в данном примере является попадание не менее трех сигналов этих изображений на единичные состояния (1, 6, 7, 8) АМ. Отклик на попадание сигналов в остальные A -элементы равен “0”. Так, если на вход РС подано изображение, имеющее на АМ дислокацию связей 3 7 9, что отвечает комбинации 0 1 0, то РС классифицирует это изображение как C (т. к. $k/2 < 2$), если же адреса расположения связей 1 3 7 8, что соответствует комбинации 1 0 1 1, то РС отнесет это изображение к образу B (т. к. $k/2 > 2$).

Количество изображений образов B и C , которое может распознать РС, равно C_m^r . В нашем примере это 5040. Удельный вес того или иного образа зависит от соотношения нулей и единиц в двоичной m -битовой комбинации (это может быть и ν -битовая, где $m \geq \nu > k$, если не все A -элементы задействованы в обучающей выборке). Так как обычно количество тестируемых изображений образов B и C примерно одинаково, то и число единиц в m -битовой комбинации должно быть примерно равно числу нулей с небольшим преобладанием единиц (т. к. при четных k выход равен нулю при нестрогом неравенстве числа нулей в k -битовой комбинации числу $k/2$).

При любом произвольном распределении единичных состояний по АМ существует конечное число изображений, равное C_m^r , которое будет удовлетворять данному распределению. Однако дислокация связей 0 1 0 может оказаться образованной изображением образа B , а не C , а дислокация 1 3 7 8 — изображением образа C . Задача РС состоит в отыскании такого распределения единичных состояний по A -элементам, при котором для всех изображений образа B на выходе логического элемента будет получен сигнал “1”, а для всех изображений образа C на выходе логического элемента будет получен сигнал “0”. Это достигается в процессе обучения РС, т. е. в такой настройке параметров, определяющих состояние АМ, в результате которой будут правильно классифицированы не только все изображения обучающей выборки, но и те, которые ранее не предъявлялись РС. В случае использования оптических связей роль таких параметров играют показатель преломления n , толщина слоя d A -элемента и некоторые другие параметры. Влияние значений этих параметров на квадрат модуля коэффициента отражения $|r|^2$ будет показано далее.

Обучение РС при топологической обработке лучше производить не после каждого предъявления нового изображения, как это делается при обучении НС с учителем, а после предъявления всех изображений обучающей выборки и после запоминания адресов каждого изображения в памяти компьютера, управляющего настройкой АМ. Настройка весовых коэффициентов при обучении традиционных РС — достаточно длительный процесс. Согласно [3, с. 130], при быстродействии ЭВМ 10^6 операций в секунду РС затрачивает на один шаг обучения 0,5 мин. Для разделения двух образов требуется 120—200 мин. При по-

вышении производительности ЭВМ до 10^9 операций в секунду время обучения и использования снижается до 0,1—2 мин. Современные суперкомпьютеры имеют быстродействие, в сотни и тысячи раз превышающие 10^9 операций в секунду, но все равно временные параметры обучения оставляют желать лучшего.

Использование топологической технологии обработки информации при распознавании образов позволит существенно снизить время обучения даже при умеренной производительности ЭВМ.

Выше отмечалось, что искомая m -битовая комбинация, характеризующая распределение единичных состояний по АМ, должна иметь примерно одинаковое количество двоичных нулей и единиц. Это значительно сокращает поиск желаемой комбинации. Даже простым перебором этих комбинаций с помощью ЭВМ можно получить выигрыш во времени настройки по отношению к традиционным РС при не очень больших m . Но в этом нет необходимости, т. к. топологический метод позволяет оптимизировать поиск желаемой m -битовой комбинации. Вот алгоритм этого поиска:

1. На вход РС последовательно подать K ($K \leq C_m^r$) изображений распознаваемых образов.
2. Установить и запомнить способы их размещения по m (или ν) A -элементам (их адреса).
3. Вызвать номера позиций (адреса), принадлежащие одному образу (если такие есть), и присвоить им соответствующие значения (например, “1” для B и “0” для C).
4. Выявить A -элементы, в которых преобладает один из образов (см. таблицу в примере), и присвоить им значения преобладающего образа.
5. Выявить с помощью ЭВМ образ с преобладающим числом неправильных ответов (в примере это B), т. е. установить, какие позиции нужно инвертировать (в примере это позиции с “0”).
6. Выявить критические позиции (которые не стоит инвертировать, чтобы не увеличивать число неправильных ответов).
7. Инвертировать некритические позиции и позиции с равным для образов B и C количеством каналов.
8. Обучение окончено, если получена такая m -битовая комбинация, что для всех показанных изображений образа B выполнено условие $M > k/2$, а для всех изображений образа C — $M \leq k/2$, где M — число единиц в m -битовой комбинации.

Например, при $k=4$ 10-битовая комбинация 1110001101 удовлетворяет любому из шестнадцати изображений образов B и C , способы размещения которых на АМ (номера позиций) и их бинарные значения приведены ниже.

B	1 3 5 7	1 1 0 1	B	3 6 8 10	1 0 1 1
C	2 4 6 7	1 0 0 1	C	1 4 5 7	1 0 0 1
B	3 5 8 10	1 0 1 1	B	2 3 7 8	1 1 1 1
C	2 4 5 9	1 0 0 0	C	3 5 6 9	1 0 0 0
B	2 3 6 10	1 1 0 1	B	4 7 8 10	0 1 1 1
C	3 5 6 7	1 0 0 1	C	2 5 9 10	1 0 0 1
B	1 2 5 8	1 1 0 1	B	3 7 8 9	1 1 1 0
C	2 6 7 9	1 0 1 0	C	4 5 7 8	0 0 1 1

Подчеркнем, что номера позиций (адреса) каналов B и C заданы стохастически.

Отыскание m -битовой комбинации упрощается с ростом отношения m/k , т. к. уменьшается вероятность совпадения позиций альтернативных образов. Найденной 10-битовой комбинации удовлетворяют 210 изображений образов B и C , т. к. $C_{10}^6 = 210$.

В процессе обучения при последовательном предъявлении РС изображений по каждому A -элементу производится автоматический подсчет числа попаданий на него образов B и образов C . То есть при запоминании адресов A -элементов отраженные от них оптические сигналы поступают не на логический элемент, а на триггерные счетчики. Данные с этих счетчиков поступают в память ЭВМ, в которой поддерживается таблица адресов k оптических каналов, сведения о количестве оптических каналов по соответствующему адресу. Ниже приведена таблица для выборки из шестнадцати изображений в приведенном выше примере.

Распределение числа попаданий наиболее интенсивных оптических каналов по десяти адресам матрицы ассоциативных элементов для образов B и C

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B	2	2	6	1	3	2	4	6	1	4
C	1	4	2	4	6	4	5	1	4	1

Из приведенных в данном примере данных видно, что если имеется хотя бы один несовпадающий адрес у альтернативных образов (см., например, 1-й и 6-й способы размещения), то эти образы могут быть распознаны топологическим методом как разные. Но при большом количестве изображений не всегда удается найти m -битовую комбинацию, удовлетворяющую всем изображениям.

Компьютерное моделирование процессов настройки A -элементов показало, что после установления значения m -битовой комбинации при помощи шагов, указанных в алгоритме, в большинстве случаев реализуется 75—85% обучающей выборки. При больших C_m^k это практически сколь угодно большое число, ограниченное лишь количеством A -элементов РС. Однако можно привести примеры такого размещения образов на АМ, когда даже полный перебор всех возможных комбинаций из m двоичных элементов не реализует 100% обучающей выборки. В этом случае рекомендуется изменить v и k путем изменения порогового значения устройства П1. Увеличивая число прошедших на АМ оптических каналов, можно добиться 100%-ной реализации обучающей выборки.

Таким образом, еще одним преимуществом данного НС перед традиционной однослойной РС заключается в том, что можно точно указать, какое максимальное количество шагов настройки необходимо сделать в процессе случайного поиска нужной v -битовой комбинации. При v задействованных A -элементах полный набор v -битовых комбинаций равен 2^v . Однако, как отмечалось выше, необходимости в полном переборе нет, т. к. для настройки РС на распознавание используется значительно меньшее количество v -битовых комбинаций, а именно, те, у которых число двоичных единиц примерно равно числу дво-

ичных нулей. Максимальное количество изображений того или иного образа, которое может быть реализовано при различных v -битовых комбинациях, может быть “зашиито” в постоянном запоминающем устройстве ЭВМ, обслуживающей РС.

При поступлении на вход РС данных, которые не встречались в процессе обучения, РС выполняет функцию обобщения (generalization), т. е. на основе этих данных дает обоснованный результат по классификации новых изображений. Дислокация этих изображений на АМ не должна сильно отличаться по крайней мере от одного правильно классифицированного примера из обучающей выборки. В топологическом методе эта схожесть проявляется в небольшом отличии k -битовой комбинации нового изображения и k -битовой комбинации ближайшего “соседа”. Если число k достаточно велико и критерий $M > k/2$ (или $M < k/2$) выполнен с запасом, то инвертирование двух-трех двоичных знаков в k -битовой комбинации, связанное с отличием в написании данного образа или с его искажением шумами, не изменит правильность его классификации.

Параллельная топологическая обработка информации (“многоцветный” вариант)

При подаче на вход РС одновременно N изображений и при их одновременной обработке быстроедействие РС возрастет в N раз как при обучении РС, так и во время ее работы в режиме распознавания. Это достигается использованием N независимых спектральных каналов. Слово “многоцветный” в названии раздела взято в кавычки, т. к. различие в цветах используемых спектральных каналов не всегда заметно на глаз. (В работе [4], например, различие в длине волны каналов настолько мало, что зрение человека воспринимает их как один цвет.)

Все N изображений одновременно проецируются на ИМ. Каждому из них соответствует определенная длина волны λ_i , так что в световом потоке, исходящем от ИМ, одновременно присутствует N дискретных длин волн — $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$.

Так как разные изображения дают разные дислокации оптических каналов на АМ, то их количество и требуемое состояние A -элемента случайным образом колеблется в широких пределах от одного A -элемента к другому. Поэтому при работе АМ на отражение каждый A -элемент должен обладать способностью принимать одно из 2^N отражающих состояний [5]. Обучение РС и параллельная обработка информации по N спектральным каналам ничем не отличается от обработки информации в монохроматическом варианте. В результате обучения в каждом A -элементе устанавливается одно из 2^N отражающих состояний. При

$N=2$, например, это состояния $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, где едини-

цы означают высокие значения коэффициента отражения, а нули — малые значения или полное отсутствие отражения. Верхние значения сигналов соответствуют длине волны λ_1 , а нижние — λ_2 . При $N=3$ число таких состояний равно 8, при $N=4$ — 16 и т. д.

В работе [5] показано, как реализовать такие состояния для $N=2$ и $N=3$, а в [4, 6, 7] — для $N \approx 10$. Какая комбинация отраженных и неотраженных длин волн реализуется от некоторого A -элемента, определяется выражениями [5]

$$|r|^2 = \left| \frac{Y^{(3)} - 1}{Y^{(3)} + 1} \right|^2;$$

$$Y^{(3)} = \frac{Y^{(2)} + in_3 \operatorname{tg}(kd_3 n_3)}{1 + i \frac{Y^{(2)}}{n_3} \operatorname{tg}(kd_3 n_3)}; \quad (2)$$

$$Y^{(2)} = Y_s + \frac{1}{1 + i \frac{Y_s}{n_1} \operatorname{tg}(kd_1 n_1)}, \quad (3)$$

где $Y^{(3)}$ — входная проводимость слоя 3;
 $Y^{(2)}$ — входная проводимость слоя 2;
 $Y_s = Z_s \sigma_2 d_2$;
 Z_s — импеданс свободного пространства, $Z_s = 377$ Ом;
 σ_2 — удельная электропроводность пленки 2;
 d_2 — ее толщина.

Для одновременной обработки изображений по N спектральным каналам структура A -элемента должна содержать два слоя (например, из фоторефрактивного материала), разделенных электропроводящей пленкой [4—6]. Показатель преломления A -элемента теперь принимает не два, а 2^N значений.

Логический элемент “И” также должен обрабатывать информацию по N спектральным каналам [8] или использовать технологию спектрального мультиплексирования [9]. В этом случае в схеме рис. 1 между АМ и N логическими элементами необходимо разместить мультиплексор, выполняющий функцию спектрального уплотнения сигналов, и демультимплексор, выполняющий обратную операцию — разделение спектрально уплотненных каналов по соответствующим приемникам.

Синтез традиционной и топологической архитектур

В этой части мы рассмотрим возможность одновременного распознавания образов при синтезе одночастотного топологического варианта РС и элементарной НС (т. е. содержащей на выходе только один резистивный (R) элемент).

До сих пор способы обработки визуальной информации этими РС рассматривались изолированно друг от друга. Объединение двух информационных технологий (традиционной и топологической) в одной конструкции позволит повысить производительность РС.

При рассмотрении топологической обработки информации отмечалось, что на выходе АМ образуются условно одинаковые по амплитуде сигналы. Логический элемент “И” (ЛЭ) воспринимает их равными двоичной единице, если значение амплитуды сигнала в данном канале выше порогового значения $U_{\text{п}}$, установленного в П1 (см. рис. 1).

Чтобы две информационные подсистемы могли дополнять друг друга, введем вновь в конструкцию РС

нейронные сети с их синаптическими весами, сумматором и резистивными элементами. Тогда в функционировании традиционной нейронной подсистемы практически ничего не изменится. Уровни сигналов, используемых этой подсистемой, будут лежать в диапазоне значений, превышающих по модулю пороговое значение $U_{\text{п}}$, только количество обрабатываемых сигналов будет $\leq k$.

Обе подсистемы будут иметь практически одинаковый состав исполнительных элементов. Только на выходе из АМ происходит разделение информационных потоков. M из k сигналов на выходе ассоциативной матрицы являются носителями информации двух подсистем. Пройдя логический элемент “И”, имеющих $k/2$ входов, эти M сигналов поступают в сумматор и затем в R -элемент, который формирует сигнал “1” или “0” на выходе традиционной РС. При прохождении логического элемента происходит обработка первого потока информации. Логический элемент “И” дает ответ на первый вопрос (например, заглавная или строчная тестируемая буква), игнорируя имеющийся разброс значений амплитуды сигналов. В сумматоре и R -элементе определяется ответ на второй вопрос (например, к классу B или C относится тестируемая буква) с учетом различия по уровням сигналов. Таким образом, одновременное распознавание образов возможно не только путем добавления R -элементов, но и путем сочетания двух способов обработки сигналов.

Рассмотрим теперь, какие преимущества дает одновременная обработка информации двумя способами при распознавании двух образов. То есть о правильности ответа на вопрос будем судить по реакции в двух подсистемах (по выходу ЛЭ и R -элемента). Например, пусть правильному ответу при предъявлении образа B на выходе соответствует 10 или 01 (первая цифра двухбитовой комбинации соответствует, например, выходу ЛЭ, а вторая — R -элемента), а образу C — 11 или 00.

В случае несовпадения двухбитовой комбинации с предъявленным изображением при обучении РС проводится настройка одновременно двух подсистем. Остановка обучения происходит в тот момент, когда одна из подсистем первой закончит настройку. Таким образом, упрощается и сокращается процедура обучения. В памяти ЭВМ при этом сохраняется информация не только о весовом состоянии связей, но и о топологии связей.

Выводы

1. Предложенный метод обработки визуальной информации позволяет распознавать образы на основе изменения распределения единичных состояний матрицы ассоциативных элементов, приводящих к изменению топологии связей между информационной матрицей и АМ.

2. Результаты моделирования алгоритма обучения распознающей системы показали, что 75—85% изображений обучающей выборки может быть реализовано в течение короткого периода времени за несколько шагов по предложенному алгоритму.

3. Обучение РС может протекать за конечное счетное число шагов.

4. Использование N -цветной оптической памяти в матрице ассоциативных элементов и в информационной матрице позволит дополнительно увеличить в N раз скорость подачи и обработки изображений.

5. Синтез двух способов обработки информации в одной конструкции расширяет возможности обучаемых машин, упрощает и сокращает процедуру их обучения.

6. Устройства реализации монохроматического и "многоцветного" вариантов метода топологической обработки информации отличаются небольшим количеством элементов (в простейшем варианте это информационная матрица, матрица ассоциативных элементов и логический элемент) и простотой их конструкции.

7. Предложенный метод может быть использован на различных этапах научно-производственной деятельности, в частности, для создания высокоскоростных и надежных оптических читающих автоматов [10] и в других системах искусственного интеллекта.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хайкин С. Нейронные сети.— М.—С.-Петербург—Киев: Изд. дом "Вильямс", 2006.

2. Математический энциклопедический словарь.— М.: Сов. энциклопедия, 1988.

3. Свечников Г. С. Интегральная оптика.— Киев: Наук. думка, 1988.

4. Демехин В. В. Обработка, передача и хранение k -уровневой информации при использовании m -частотных ($m > k$) оптических сигналов // Электромагнитные волны и электронные системы.— 2001.— № 5.— С. 64—67.

5. Демехин В. В. Вертикальная запись информации для оптических ЗУ // Автометрия.— 1997.— № 6.— С. 67—71.

6. Пат. 46082 України. Спосіб вертикального оптичного запису та зчитування інформації і пристрій для його здійснення / В. В. Демьохин.— 2002.— Бюл. № 5.

7. Демехин В. В. Метод записи k бит ($k \geq 2$) в одном элементе сигналаграммы нелинейного носителя информации // Реєстрація, зберігання і обробка даних.— 2000.— Т. 2, № 4.— С. 7—11.

8. Демехин В. В., Данилов В. В. Управляемые фазовые структуры как параллельно обрабатывающие элементы оптоэлектронной цифровой логики // Вісник Донецького ун-ту. Сер. А: Природничі науки.— 2004.— № 2.— С. 335—339.

9. Берикашвили В. Ш., Ключник Н. Т., Костенко К. Н., Яковлев М. Я. Интегрально-оптические волноводные дисперсионные элементы для ВОЛС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 2.— С. 10—16.

10. Писаревский А. Н., Чернявский А. Ф., Афанасьев Г. К. и др. Системы технического зрения.— Л.: Машиностроение, 1988.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Золотарёв В. В. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования / Под ред. Ю. Б. Зубарева.— М.: Радио и связь, Горячая линия—Телеком, 2006. — 232 с.

В монографии изложено современное состояние теории и прикладных вопросов многопорогового декодирования. Описаны конкретные методы коррекции ошибок в каналах с большим уровнем шума на основе итеративных многопороговых процедур для блочных и сверточных кодов. Даны оценки сложности процедур коррекции ошибок при программной и аппаратной реализациях. Рассмотрены алгоритмы декодирования каскадных кодов на базе внешних кодов с контролем по четности и параллельного кодирования. Предложены мажоритарные декодеры для недвоичных кодов, более эффективных, чем коды Рида—Соломона. Проанализированы специальные алгоритмы исправления стираний, сжатия данных и другие методы обеспечения высокой достоверности при передаче данных по каналам с шумами, основанные на идеях многопорогового декодирования.

Для специалистов в области теории и техники кодирования, разработчиков систем связи, студентов и аспирантов соответствующих специальностей.



НОВЫЕ КНИГИ

Качала В. В. Основы теории систем и системного анализа. Учебное пособие для вузов.— М.: Горячая линия—Телеком, 2007.— 216 с.

Рассмотрены понятия системы и системного подхода, вопросы целеобразования и моделирования, общесистемные закономерности и классификации систем, подходы к их анализу и проектированию.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Прикладная информатика (по областям)», а также студентов и аспирантов экономических и других специальностей; может быть полезным для широкого круга лиц, интересующихся вопросами системного анализа.



И. А. РОДИОНОВ, к. т. н. В. В. МАКАРЧУК

Россия, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана
E-mail: ilro@bk.ru

Дата поступления в редакцию
01.03 2007 г.

Оппонент к. ф.-м. н. С. Д. ВОТОРОПИН
(НИИ ПП, г. Томск)

КОРРЕКЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ БЛИЗОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МИКРОСХЕМ

Процесс проектирования и дальнейшего производства современной интегральной полупроводниковой микросхемы включает в себя тысячи итераций. Условно его можно разделить на две крупные части — на разработку и проектирование и на технологию производства. Сегодня обе эти части неразрывно связаны — именно технология определяет и ставит перед разработчиком внушительный ряд требований и ограничений. Проектирование ведется по модульному принципу — группой разработчиков проектируются сначала простейшие логические элементы (XOR, OR, AND, NAND и т. п.), далее, используя эти субблоки, создаются логические элементы более высокого уровня (AND8X3, NA5X3, MU8X4 и т. п.), полученные группы элементов объединяются в библиотеки. Используется так называемое «сквозное» проектирование, когда каждая ячейка не только представляет собой топологию (технологическая модель), но и соотносена с логической и электрической моделями.

Каждая библиотека разрабатывается под конкретную технологию. Разработка подобной библиотеки возможна только при участии как разработчиков, так и технологов. Разработчики определяют логику работы, архитектуру будущей микросхемы, задают электрические параметры, а технологи, помимо решения своих задач, принимают непосредственное участие в проектировании топологии. Совместно разрабатывают правила проектирования, в которых описываются возможности технологии по воспроизведению различных топологических конструкций в условиях различных технологических слоев.

После преодоления барьера в 1 мкм стало необходимым учитывать оптические эффекты, возникающие в условиях субмикронных размеров, когда длина волны экспонирующего излучения становится сопоставимой с размерами элементов на пластине. Технологические «уходы» в этом случае достигают десятков процентов от номинального размера [1].

Существуют два принципиально различных способа, позволяющих скорректировать эти уходы:

- подбор технологических режимов;
- введение коррекций на этапе проектирования микросхем.

Первый способ дает положительные результаты. Проведя анализ технологических уходов на этапах получения скрытого изображения в толще резиста, проявления (получения изображения на фоторезис-

тивной маске) и травления (получения структур на пластине), можно сделать вывод о требуемом номинальном размере на фотошаблоне для получения заданных размеров на пластине. Но при работе с субмикронными размерами становится явным отличие в проработке фигуры контроля линейных размеров: одиночных и плотноупакованных структур (рис. 1).

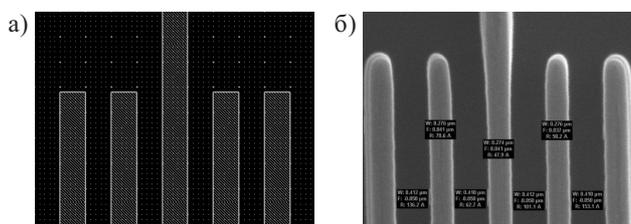


Рис. 1. Проработка фигуры контроля линейных размеров: а — при проектировании, на фотошаблоне; б — после фотолитографии, на фоторезистивной маске

На фотографиях отчетливо видны эти различия (при проектировании и на фотошаблоне все пять проводников имеют одинаковые номинальные размеры). Центральный проводник, отвечающий параметрам одиночной структуры, имеет больший размер и угол наклона боковой стенки профиля резиста, боковые проводники также утолщены со «свободной» стороны. Поэтому для одиночных и плотноупакованных структур необходимы различные режимы технологической обработки. Таким образом, необходимо либо обеспечить равномерную плотность структур по всему кристаллу микросхемы, либо произвести «тонкий» (очень точный) подбор технологических режимов. Обеспечить равномерную плотность структур при проектировании кристалла микросхемы невозможно на практике. Подобрать технологические режимы — можно, и данный метод используется в частных случаях, но это экономически невыгодно и требует больших временных затрат, что также недопустимо в условиях современного рынка.

Второй способ — введение коррекций на этапе проектирования микросхем — является основным и используется всеми мировыми производителями полупроводниковой индустрии [2, 3]. Введение коррекций на этапе проектирования позволяет:

- обеспечить заданные параметры получаемых на пластине структур;
- повысить стабильность технологического процесса (ТП);

— повысить процент выхода годных кристаллов на пластине;
 — исключить из производственного цикла стадию обработки ТП под конкретный тип изделия.

Введение коррекций может осуществляться изменением библиотечных элементов; в этом случае библиотека элементов разрабатывается фабрикой-производителем (FAB) и поставляется разработчикам микросхем. Вторым вариантом введения коррекций является использование специализированных САПР, которые позволяют обрабатывать топологию кристалла микросхемы целиком, изменяя ее в соответствии с требованиями технологии FAB [4].

В условиях стремительно изменяющегося рынка и появления инновационных методов в производстве КМОП СБИС, которые разрабатываются под современную планарную технологию, чтобы сохранять лидирующие позиции в индустрии, FAB должна обладать автоматизированной масштабируемой модульной системой проектирования, интегрированной в процесс производства. Такая система должна позволять легко и в сжатые сроки доводить инновационные идеи непосредственно до процесса производства, исключая долгосрочные этапы тестирования. Такой подход к процессу производства КМОП СБИС невозможен без моделирования ТП с использованием передовых программ CAD и TCAD. В данной работе мы попытались использовать описанный выше подход: на первом этапе было проведено моделирование и подбор типоразмеров фигур коррекции, затем по результатам моделирования был выбран диапазон и тип фигур коррекции, и на завершающем этапе результаты моделирования были проверены экспериментом.

Фигуры коррекции призваны исключить разницу в проработке на пластине элементов различной плотности, а также компенсировать эффект укорочения поликремниевых затворов в активной области транзистора, что может привести к эффекту укорочения канала, всевозможным утечкам, изменению электрических параметров транзисторов и т. п. В первом приближении выделяют три вида фигур коррекции:

- 1) изменение номинального размера на фотошаблоне на величину, определяемую технологическим уходом на операциях фотолитографии и травления (bias, рис. 2, а);
- 2) введение дополнительных линий (assist line или auxiliary, рис. 2, б);
- 3) введение дополнительных фигур типа serif, anti serif, barrel, hammerhead (рис. 2, в—е).

Рассмотрим принципы действия всех вышеперечисленных фигур коррекции.

Bias. Анализ уходов размеров проводников (как одиночных, так и в массиве) в процессе производства позволяет сделать вывод о том, каким должен быть номинальный размер проводника на фотошаблоне, чтобы на пластине получился заданный номинальный размер.

Assist line. Дополнительные линии вводятся, чтобы создать эффект плотноупакованных структур для одиночного проводника. Различия в проработке оди-

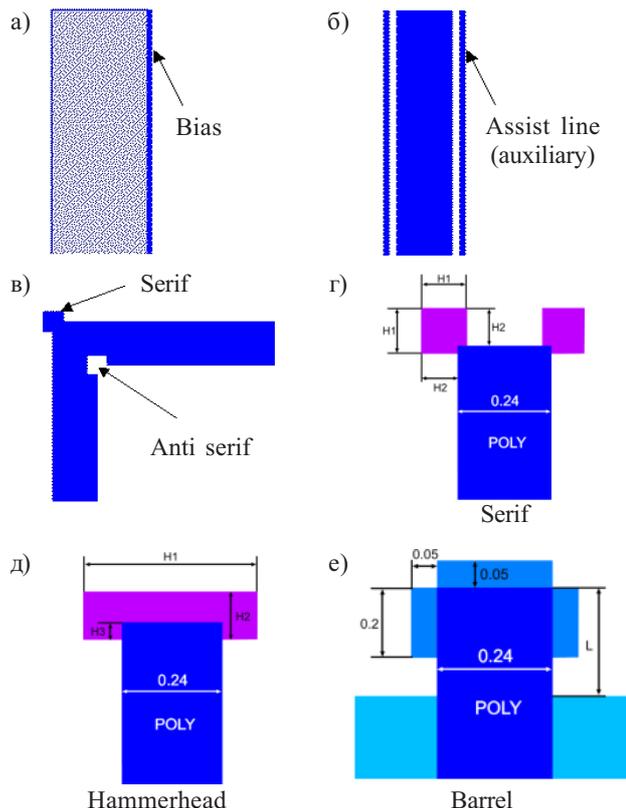


Рис. 2. Фигуры коррекции оптического эффекта близости

ночных и плотноупакованных проводников возникают в результате дифракции лучей света на соседних проводниках, в результате этого плотноупакованные структуры засвечиваются большей дозой. Дополнительные линии имеют размер 1/2—1/3 от проектной нормы. За счет этого эти линии не прорабатываются на пластине, но дифракция лучей света на них все же происходит; в результате на пластине получается одиночный проводник, имеющий размерные характеристики как у плотноупакованного.

Serif. Как известно, проводники, расположенные под прямым углом, не прорабатываются на пластине, присутствует эффект округления. Как показано на рис. 3, L-образная фигура искажается: помимо скругления углов, также происходит укорачивание проводников со стороны «открытого» конца. Чтобы избежать этого эффекта, проектировщики вводят фигуры коррекции типа serif, anti serif, barrel, hammerhead, jogs и т. п.

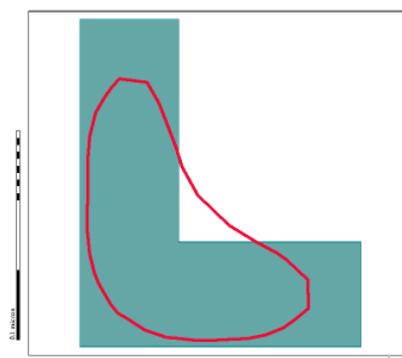


Рис. 3

В рамках разработки технологического процесса на проектную норму 0,25 мкм был выполнен ряд работ по разработке новых технологических процессов фотолитографии. Главной особенностью данных процессов является непосредственная близость паспортных возможностей используемого оборудования и целевых параметров структур, получаемых в критичных слоях. В качестве фоторезиста высокого разрешения было выбрано семейство фоторезистов Ultra-i 123 компании Rohm&Haas. Для компенсации оптического эффекта близости было проведено моделирование процесса фотолитографии. На **рис. 4** показан пример полученных результатов по итогам моделирования одиночных шин с примыканием встык.

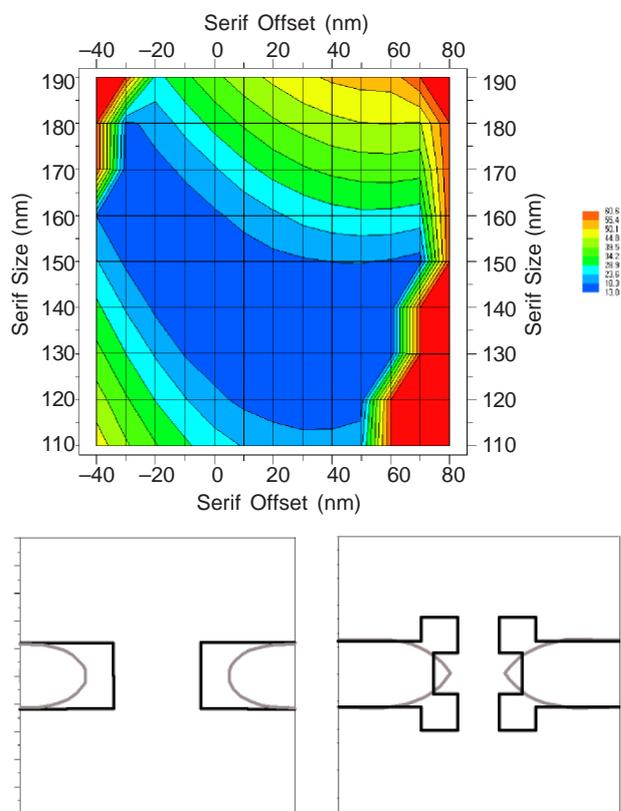


Рис. 4. Моделирование одиночных шин с примыканием встык

Моделирование элементов коррекции типа «serif» для одиночных шин номинальным размером 0,24 мкм с примыканием встык показало, что оптимальный размер Serif size=130 нм, Serif offset=20 нм.

Оценка эффективности применяемых методов коррекции — еще одна большая математическая задача, т. к. невозможно каким-либо образом провести сравнение запроектированных структур со структурами, полученными на пластине. Возможными методами оценки эффективности могут служить:

- оптические методы сравнения;
- математический анализ полученных структур.

Например, в случае анализа L-образного проводника за образ шины можно принять исходящие проводники на расстоянии $(2...3)\lambda$ от угла. Тогда, про-

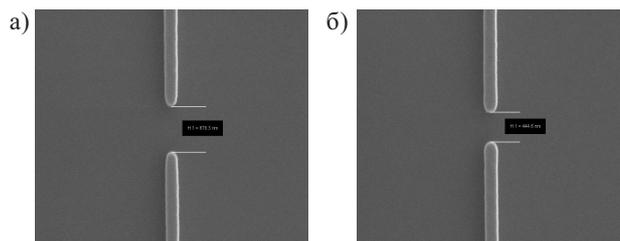


Рис. 5. Полученные на пластине одиночные шины с примыканием встык:

a — без элементов коррекции; *b* — с элементами коррекции типа «serif»

ведя по ним прямые, получим на их пересечении образ L-подобного проводника. Минимум разности площади образа и площади полученной структуры (которую можно посчитать, взяв интеграл) и даст наиболее эффективный результат.

Рассмотрение критериев оценки эффективности введения фигур коррекции оптического эффекта близости выходит за рамки настоящей статьи. Критерием качества проработки топологии для данного типа шин было выбрано укорочение шин. При заданном на шаблоне расстоянии между расположенными встык одиночными проводниками, равным 0,36 мкм, укорочение шин без элементов коррекции составило 160 нм (**рис. 5, a**). Для шин с элементами коррекции типа «serif» укорочение составило 42 нм.

Проведенный эксперимент показал, в первом приближении, следующие результаты:

- получены сведения о типах и типоразмерах фигур коррекции оптического эффекта близости для одиночных и плотноупакованных структур;
- проведено моделирование технологического процесса фотолитографии для различных типичных видов топологии;
- выбраны параметры фигур коррекции;
- сформированы критерии оценки эффективности введения фигур коррекции.

На основании проведенных исследований был спроектирован фотошаблон для отработки режимов фотолитографии и дальнейшего изучения влияния эффектов оптической близости.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Sixt P. Optical proximity correction (OPC) // Technology Review.— 2003.— Vol. 1.— Issue 7.
2. Stirniman J. P., Rieger M. L. Fast proximity correction with zone sampling // Proc. SPIE Microlithography.— 1994.— N 2197.— P. 294—301.
3. Maurer W., Waas T., Eisenmann H. Evaluation of a fast and flexible OPC package // OPTISSIMO, Proc. SPIE BACUS.— 1996.— N 2884.— P. 412—418.
4. Cui Y., Zach F. X., Butt S. et al. Is model-based optical proximity correction ready for manufacturing? Study on 0,12 um and 0,175 um DRAM Technology // Proc. SPIE Microlithography.— 2002.— N 4691.— P. 67—75.

К. ф.-м. н. Д. МЕЛЕБАЕВ, Г. Д. МЕЛЕБАЕВА, д. ф.-м. н. Ю. В. РУДЬ,
д. ф.-м. н. В. Ю. РУДЬ

Туркменистан, г. Ашхабад, Государственный университет им. Магтымгулы;
Россия, г. Санкт-Петербург, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе,
Государственный политехнический университет
E-mail: dmelebay@yandex.ru, yuryrud@mail.ioffe.ru, rudvas@spbstu.ru

Дата поступления в редакцию
02.03 2007 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ БАРЬЕРА В СТРУКТУРАХ Au-n-GaAs

Созданы и исследованы двухсторонние фоточувствительные структуры Au-n-GaAs. Показана новая возможность определения высоты барьера по методу фотоответа с высокой точностью и надежностью.

Барьеры Шоттки на основе арсенида галлия привлекают внимание исследователей как перспективные структуры для создания радиационноустойчивых полупроводниковых приборов [1]. Одним из фундаментальных параметров полупроводниковых приборов типа "металл (*m*) — полупроводник (*s*)", "металл—диэлектрик—полупроводник" (*mis*), используемых в современной опто- и микроэлектронике, является высота барьера Шоттки ($q\Phi_{B0}$). Прямым и самым точным методом определения $q\Phi_{B0}$ признан фотоэлектрический метод [2]. Он основан на полуфеноменологической теории Фаулера [3], которая применительно к выпрямляющему неточечному контакту "металл—полупроводник" впервые была использована в работах [4—6]. В этих работах был развит фотоэлектрический метод определения $q\Phi_{B0}$, основанный на измерении спектра фоточувствительности поверхностно-барьерных структур "металл—полупроводник". Возможные варианты фотоэлектрического метода определения $q\Phi_{B0}$ для *m-s*-структур при освещении *m-s*-перехода как со стороны металла, так и со стороны полупроводника, известны давно [2, 7, 8]. Однако определение $q\Phi_{B0}$ для структур "металл—GaAs" при освещении *m-s*-перехода со стороны GaAs экспериментально не развито, хотя этот вариант определения $q\Phi_{B0}$ в теоретическом аспекте обоснован [2, 8].

Настоящая работа посвящена разработке технологии получения двухсторонних фоточувствительных структур Au-n-GaAs химическим методом и исследованию влияния направления падающего света на фоточувствительность с целью повышения надежности и точности определения высоты потенциального барьера Шоттки по спектру фототока.

Объектом исследования служили почти идеальные структуры с барьером Шоттки Au-n-GaAs. Структура представляет собой пластину GaAs, на одной стороне которой находится полупрозрачный барьерный

Работа поддержана программой ОФН РАН «Новые принципы преобразования энергии в полупроводниковых структурах».

контакт (слой Au), а на противоположной — кольцевой омический контакт (In+3%Te). Пластинки GaAs были разделены на две группы в зависимости от концентрации электронов в полупроводнике. В одной группе пластинки имели концентрацию электронов $n=(1...3)\cdot 10^{17}$ см⁻³ (300 К), а в другой — $n=(1...3)\cdot 10^{16}$ см⁻³ (300 К). Обе группы пластинок ориентированы по кристаллографическим плоскостям (100). Исходные кристаллы GaAs были выращены методом Чохральского, и их толщина составляла ≈250 мкм.

Омический контакт к n-GaAs изготовлялся сплавлением сплава, содержащего In+3%Te, в атмосфере водорода при температуре около 500°C. Полупрозрачный барьерный контакт создавался химическим осаждением слоя золота при комнатной температуре из водного раствора $\text{HAuCl}_4(4\text{г/л})+\text{HF}(100\text{мл/л})$ по методике [9]; толщина слоя золота составляла 100—150 Å. Перед химическим осаждением золота либо перед формированием диэлектрического (оксидного) слоя поверхность GaAs обрабатывалась в бром-метиловом травителе 4%Br₂+96%CH₃OH.

Площадь барьерного контакта (*S*) у разных структур составляла 0,05—0,3 см². К омическому и барьерному контактам с использованием индия припаивались серебряные провода. Измерялись вольт-фарадные (*C-U*) и вольт-амперные (*I-U*) характеристики, а также спектр фототока короткого замыкания ($I_{j0}-h\nu$). Все измерения выполнены при комнатной температуре (300 К).

Экспериментальное исследование свойств поверхностно-барьерных структур Au-n-GaAs выполнено в два этапа. На первом этапе без открытия «окна» из GaAs проведены исследования *C-U*, *I-U*, $I_{j0}-h\nu$ -характеристик структур. На основе анализа электрических и фотоэлектрических свойств Au-n-GaAs-структур определены параметры кристаллов GaAs (концентрация основных носителей заряда $n=N_d-N_a$, энергия прямых переходов $E_0=E_g$), а также оценены параметры энергетических диаграмм структур "металл—полупроводник GaAs": ширина слоя объемного заряда W_0 и максимальное электрическое поле E_{m0} при нулевом смещении, высоты барьера Шоттки $q\Phi_{B0}$. Измерялась также зависимость прямого темнового тока *I* от напряжения *U*, которая в интервале плотностей токов 10^{-7} — 10^{-2} А/см² оказалась экспоненциальной — $I=I_s \exp(qU/\beta kT)$, где I_s — ток насыщения.

Из этого выражения определялся коэффициент идеальности структуры β , который зависит от толщины промежуточного диэлектрического слоя [10].

Значение высоты барьера Шоттки определялось фотоэлектрическим методом, а также (для сравнения) методом вольт-фарядных характеристик на частоте 10 кГц. Полученные двумя независимыми методами значения $q\Phi_{B0}$ практически совпадают (см. **таблицу**). На данном этапе исследования для определения $q\Phi_{B0}$, E_g измерялись спектры fotocувствительности в диапазоне энергии фотонов $h\nu=0,9 \dots 2,2$ эВ. При этом структуры Au-n-GaAs освещались со стороны Au.

Электрические и фотоэлектрические параметры структур Au-n-GaAs при T=300 K (данные получены до открытия окна из GaAs)

Но-мер	S, см ²	N _d -N _a , см ⁻³	E _{m0} , В/см	β	qΦ _{B0} , эВ (C-U)	qΦ _{B0} , эВ (I ₀ -hν)
1	0,112	2,2·10 ¹⁶	7,1·10 ⁴	1,10	0,98	0,88
2	0,069	3·10 ¹⁷	2,8·10 ⁵	1,09	0,90	0,89
3	0,062	3·10 ¹⁶	8,5·10 ⁴	1,08	0,91	0,89
4	0,125	1,5·10 ¹⁶	6,45·10 ⁴	1,27	1,08	0,92

Для удобства сравнения и дальнейшего сопоставительного анализа фотоэлектрических свойств исследуемых структур Au-n-GaAs их измеренные характеристические параметры приведены в таблице.

При освещении m-s-перехода со стороны GaAs важным параметром становится толщина (d) освещаемого полупроводника. Для получения заметного фототока генерация неравновесных носителей заряда светом должна происходить в основном в области около m-s-перехода толщиной $d \approx 2(W+L)$ [11], где L — диффузионная длина неосновных носителей заряда. В наших экспериментах, согласно измерениям, толщина слоя объемного заряда W₀ при отсутствии смещения составляла 0,06—0,31 мкм. Диффузионная длина дырок L_p равнялась 0,6—1,5 мкм.

Для анализа характеристик структур, сравнения их fotocувствительности при освещении m-s-перехода (как со стороны полупрозрачного металла (Au), так и со стороны светопроницаемого полупроводника (GaAs)) и определения qΦ_{B0} в фаулеровской области спектра возьмем в качестве критерия величину вентильной фото-эдс (U_{f0}). При освещении m-s-перехода монохроматическом светом как со стороны металла, так и со стороны полупроводника, и соблюдении условия $d \approx 2(W_0 + L_p)$ вентильные фото-эдс для fotocувствительных m-s-структур должны быть близкими, т. е. $U_{f0} \approx U_{f0m} \approx U_{f0s}$. Для удовлетворения этих условий приходится вытравливанием открыть окно в GaAs, чтобы свет проходил к m-s-переходу через полупроводник.

Согласно теоретическим соображениям, в изготовленных структурах d должно быть 1,5—4 мкм. В этом случае можно получить фотоответ при энергиях фотонов $h\nu > E_g$ при освещении со стороны GaAs, и тогда должно выполняться условие $U_{f0} \approx U_{f0m} \approx U_{f0s}$. Однако в наших экспериментах для достижения поставленной цели выполнение условия $h\nu > E_g$ необязательно, поскольку фаулеровская область охватывает спектр $q\Phi_{B0} < h\nu < E_g$. В этом случае реальная тол-

щина должна быть больше, чем теоретическая толщина 1,5—4 мкм. Чтобы получить реальную толщину полупроводника, глубина травления GaAs отслеживалась по значению U_{f0}. Экспериментально мы достигли $U_{f0} \approx U_{f0m} \approx 0,8U_{f0s}$. Это условие отвечает реальной толщине.

Для прохождения света к m-s-переходу со стороны GaAs химическим вытравливанием открывались окна из всех исследуемых структур Au-n-GaAs, которые имели толщину полупроводника n-GaAs примерно 250 мкм.

Для открытия окна из GaAs применялась следующая методика. Кольцевые омические и барьерные контакты предварительно покрывались химически стойким лаком. Затем внутри кольцевого омического контакта в центре пластинки GaAs травителем HNO₃: HF:H₂SO₄=7:1:1 [12] открывалось окно. Требуемая глубина травления GaAs обеспечивалась периодическим контролем U_{f0}. Когда толщина полупроводника d становилась такой, что выполнялось условие $U_{f0m} \approx 0,8U_{f0s}$, травление прекращалось. У разных m-s-структур диаметр окна составлял 0,2—0,3 см. После открытия окна лак снимался механически и структуры промывались этиловым спиртом.

Структуры Au-n-GaAs, предназначенные для дальнейших исследований, обладали fotocувствительностью при освещении как со стороны слоя Au, так и со стороны GaAs (**рис. 1, a**). В наших экспериментах значения U_{f0} при освещении структуры со стороны

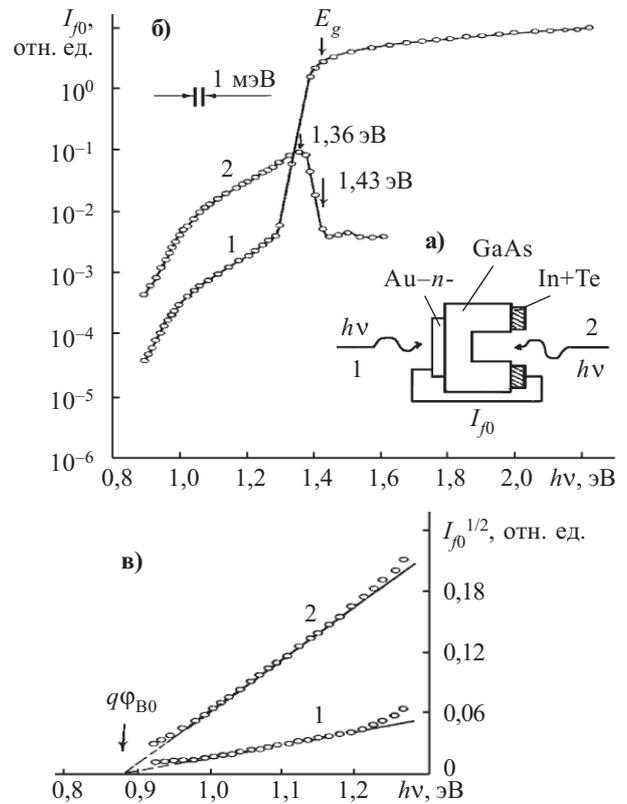


Рис. 1. Схема измерений фототока короткого замыкания I_{f0} в структурах Au-n-GaAs (a) и зависимости фототока (I_{f0}, I_{f0}^{1/2}) от энергии фотона (hν) для структуры № 1 (б, в): 1 — освещение со стороны Au; 2 — освещение со стороны GaAs (T=300 K)

Au $U_{f0m}=0,35...0,45$ В, а при освещении со стороны GaAs U_{f0s} достигали $0,25...0,35$ В, т. е. выполняется условие $U_{f0} \cong U_{f0m} \cong 0,8U_{f0s}$.

После открытия окна из GaAs ранее исследуемые $m-s$ -структуры становились структурами с двухсторонней фоточувствительностью (рис. 1, а). На втором этапе выполнены только фотоэлектрические исследования свойств таких структур. В спектральных измерениях освещаемая площадь $m-s$ -перехода составляла примерно $0,01$ см². Фототок приведен к равному числу падающих фотонов.

Типичные спектральные характеристики двухсторонней фоточувствительной структуры Au- n -GaAs в области энергии фотонов $0,9-2,2$ эВ при освещении как со стороны полупрозрачного слоя Au, так и со стороны светопроницаемого полупроводника GaAs, представлены на рис. 1, б. Из него хорошо видно, что в исследуемых структурах форма спектра фототока короткого замыкания зависит от геометрии освещения. При освещении $m-s$ -перехода со стороны Au зависимость фототока I_{f0} от $h\nu$ широкополосная (рис. 1, б, кривая 1). Фоточувствительность структур при $h\nu=0,9...1,25$ эВ на 2—3 порядка ниже, чем при энергиях фотонов, превышающих ширину запрещенной зоны полупроводника E_g . Зависимость фототока I_{f0} от $h\nu$ в диапазоне $h\nu=0,95...1,25$ эВ подчиняется закону Фаулера, т. е. $I_{f0} \cong (h\nu - q\phi_{B0})^2$.

Экспериментальная зависимость $I_{f0}^{1/2}$ от $h\nu$ (рис. 1, в, кривая 1) была линейной, и высота барьера $q\phi_{B0}$ определялась экстраполяцией этой зависимости к значению $I_{f0}^{1/2}=0$. В исследованных структурах $q\phi_{B0}$ лежала в пределах $0,86-0,92$ эВ. Для разных структур величины $q\phi_{B0}$ были разными (см. таблицу). Значение ширины запрещенной зоны n -GaAs (рис. 1, б, кривая 1) определено по зависимости I_{f0} от $h\nu$ [13] и составляет $1,43$ эВ при 300 К. Спектр фототока при энергиях фотонов $h\nu > E_g$ подробно изучался в [14] и в настоящей работе не рассматривается.

На рис. 1, б, кривая 2 приведено наблюдаемое экспериментально спектральное распределение фоточувствительности структур Au- n -GaAs (структура № 1) при освещении со стороны GaAs. Обнаружено, что зависимость фототока I_{f0} от $h\nu$ при таком направлении освещения имеет селективный характер, и максимум фоточувствительности расположен вблизи $h\nu_m \cong 1,36$ эВ. Установлено, что при освещении $m-s$ -перехода со стороны GaAs зависимость фототока I_{f0} от энергии фотонов в области $h\nu=0,95...1,25$ эВ также подчиняется закону Фаулера: $I_{f0} \cong (h\nu - q\phi_{B0})^2$. Из этой зависимости определена величина $q\phi_{B0}$, значение которой равно $0,88$ эВ. Для одной и той же структуры — как при освещении Au, так и при освещении GaAs — получены одинаковые значения $q\phi_{B0}$ (рис. 1, в), например для структуры № 1 $q\phi_{B0}$ оказалось равным $0,88$ эВ.

Экспериментальным исследованием двухсторонней фоточувствительной структуры Au- n -GaAs при освещении как со стороны Au, так и со стороны GaAs, показано, что фототок в области спектра $h\nu=0,95...1,25$ эВ в основном определяется эмиссией электронов из зо-

лота. При освещении аналогичных структур со стороны золота такое же утверждение ранее отмечено в работе [15].

Было обнаружено, что при освещении структур со стороны GaAs фототок в фаулеровской области при близких условиях фотовозбуждения возрастает примерно на порядок величины относительно случая освещения со стороны полупрозрачной Au (рис. 1, б, кривая 2). Это означает, что при освещении Au- n -GaAs-структур со стороны GaAs, а именно в фаулеровской области спектра ($h\nu=0,95...1,25$ эВ), фоточувствительность структур увеличивается на порядок. Это увеличение может быть вызвано различиями в спектрах оптического пропускания пленки золота и окна в пластине GaAs в пределах фаулеровского диапазона энергий. Следует также указать, что в случае определения $q\phi_{B0}$ Au- n -GaAs-структур при освещении со стороны GaAs появляется возможность использовать толстый слой барьерного металлического контакта и тем самым обойти технологические трудности, связанные с изготовлением тонких полупрозрачных металлических слоев.

Фактически нами предложен ранее не используемый усовершенствованный вариант фотоэлектрического метода определения высоты барьера Шоттки для структур Au- n -GaAs при освещении их со стороны окна из GaAs. Фоточувствительность полученных барьеров в условиях возбуждения со стороны GaAs оказалась не менее чем на порядок величины выше, чем при их освещении со стороны тонких пленок Au. В нашей работе высказано только предположение о том, что эффект увеличения фоточувствительности обусловлен различиями в оптическом пропускании излучения полупроводником GaAs и пленкой Au. На самом деле это различие может быть связано и с другими особенностями прохождения излучения в столь различных оптических средах. Этот вопрос весьма сложный и требует дальнейших исследований.

На рис. 2 представлена зависимость корня квадратного из фототока от энергии фотона фаулеровского участка спектра для структуры Au- n -GaAs № 2 до и после открытия окна из GaAs и при разных на-

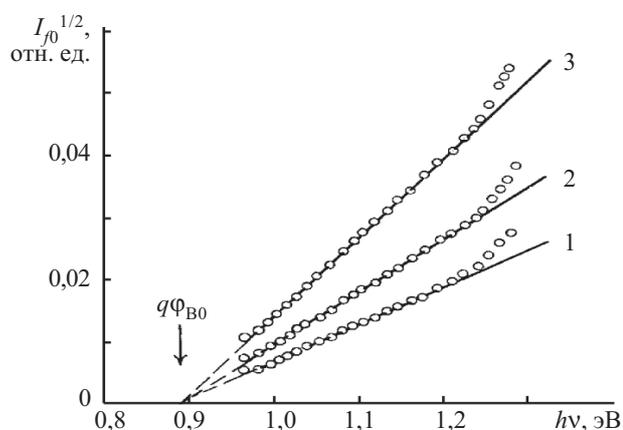


Рис. 2. Зависимость фототока от энергии фотонов для структуры Au- n -GaAs № 2 при разных направлениях освещения ($T=300$ К):

1 — освещение со стороны Au до открытия окна; 2 — освещение со стороны Au после открытия окна; 3 — освещение со стороны GaAs

правлениях освещения. Как видно из рисунка, величина высоты барьера $q\Phi_{B0}$ не зависит от направления освещения и изменения конструкции структуры и равна 0,89 эВ. Следовательно, использованная в работе технология вскрытия окна из GaAs в структурах Au-n-GaAs не вносит каких-либо необратимых изменений. Таким образом, значение высоты барьера Шоттки можно брать как фундаментальный параметр для диагностики качества границы раздела "металл—полупроводник".

Из анализа экспериментальных зависимостей фототока короткого замыкания I_{f0} от энергии фототоков $h\nu$ для разных фоточувствительных структур Au-n-GaAs, освещаемых со стороны GaAs, найдены значения высоты барьера Шоттки $q\Phi_{B0}$. На рис. 3 представлены зависимости $I_{f0}^{1/2}$ от $h\nu$ в фаулеровской области спектра для почти идеальных структур Au-n-GaAs при освещении m-s-перехода со стороны GaAs.

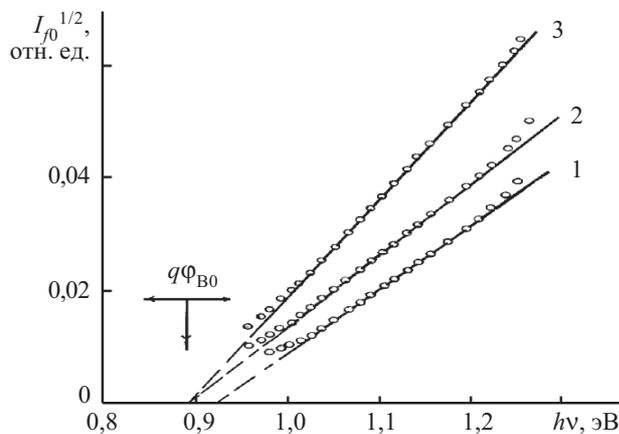


Рис. 3. Зависимость фототока от энергии фотона для трех m-s-структур Au-n-GaAs при освещении со стороны окна из GaAs ($T=300$ K):

1 — структура № 4 с тонким диэлектрическим слоем ($\beta=1,27$, $\delta \approx 40 \text{ \AA}$); 2, 3 — почти идеальные структуры ($\beta < 1,1$, $\delta < 15 \text{ \AA}$) соответственно № 2 и № 3

Как видно из рисунка, для двух структур Au-n-GaAs (№ 2, № 3) получены одинаковые значения $q\Phi_{B0}$, которые равны 0,89 эВ. Важно подчеркнуть, что в таких структурах образование сверхтонкого промежуточного диэлектрического слоя ($\beta < 1,1$, $\delta < 15 \text{ \AA}$) между полупроводником и металлом не приводит к изменению высоты потенциального барьера. Эти результаты совпадают с полученными для идеальных барьеров Шоттки Au-n-GaAs при освещении со стороны слоя золота в [16].

Присутствие на границе раздела "металл—полупроводник" тонкого промежуточного диэлектрического слоя ($\beta=1,27$, $\delta \approx 40 \text{ \AA}$) между полупроводником и металлом меняет свойства границы раздела, что и вызывает изменение высоты барьера (рис. 3, кривая 1). В выполненном цикле исследований установлено, что присутствие между полупроводником и металлом тонкого диэлектрического слоя толщиной от 15 до 40 \AA не снижает высоту потенциального барьера структур Au-n-GaAs.

Найденные в фаулеровской области спектра фототока $h\nu=0,95 \dots 1,25$ эВ значения $q\Phi_{B0}$ для Au-n-GaAs-структур при освещении m-s-перехода со стороны GaAs хорошо согласуются с другими литературными данными [17—21], полученными в последние годы по методу фотоответа при освещении m-s-перехода со стороны полупрозрачного слоя металла.

Результаты экспериментального исследования двухсторонней фоточувствительности структур Au-n-GaAs в фаулеровской области спектра показали, что не используемый ранее вариант фотоэлектрического метода определения $q\Phi_{B0}$ при освещении со стороны GaAs более надежен, технологичен, информативен и удобен, чем известный вариант фотоэлектрического метода при освещении со стороны золота [14].

Таким образом, результаты комплексных исследований барьеров Шоттки позволяют сделать вывод о том, что для точного определения высоты барьера можно использовать контактный фотоэлектрический метод. Этот метод дает возможность определить величину высоты потенциального барьера без разрушения структур "металл—GaAs" как при освещении m-s-перехода со стороны металла, так и при освещении со стороны GaAs. Высота барьера для структур Au-n-GaAs при освещении со стороны GaAs определена впервые [21]. По величине высоты потенциального барьера, найденной фотоэлектрическими методами, можно судить о качестве границы раздела "металл—полупроводник". В результате предложен вариант фотоэлектрического метода определения $q\Phi_{B0}$ для структур "металл—GaAs" при освещении m-s-перехода со стороны GaAs.

Обнаружено, что предлагаемый метод обладает высокой фоточувствительностью, поскольку в фаулеровской области спектра при освещении со стороны GaAs фоточувствительность структур Au-n-GaAs увеличивается примерно на порядок. В силу этого указанный метод представляет интерес для исследования свойств границы раздела "металл—полупроводник", "металл—диэлектрик—полупроводник". Данный метод особенно перспективен для изучения фундаментальных свойств межфазной границы раздела, а также полезен при разработке новых полупроводниковых приборов для современной электроники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. Н. Айнспрука, У. Уиссмена.— М.: Мир, 1988.
2. Зи. С. М. Физика полупроводниковых приборов.— М.: Энергия, 1973.
3. Fowler R. H. The analysis of photoelectric sensitivity curves for clean metal at various temperatures // Phys. Rev.— 1931.— Vol. 38, N 1.— P. 45—56.
4. Crowell C. R., Spitzer W. G., White H. G. Photoexcited holes running in Au // Appl Phys. letter.— 1962.— Vol. 1.— P. 3—6.
5. Mead C. A., Spitzer W. G. Fermi position at metal-semiconductor interfaces // Phys. Rev.— 1964.— Vol. 134.— P. A 713—A 716.
6. Sze S. M., Crowell C. R., Kahng D. Photoelectric determination of the image force dielectric constant for hot electrons in Schottky barriers // J. Appl. Phys.— 1964.— Vol. 35.— P. 2534—2536.

7. Стриха В. И., Бузанева Е. В., Радзиевский И. А. Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки (физика, технология, применение).— М.: Сов. радио, 1974.
8. Mead C. A. Metal-semiconductor surface barrier //Solid-State Electron.— 1966.— Vol. 9, N 11/12.— P. 1023—1033.
9. Беркелиев А., Гольдберг Ю. А., Мелебаев Д., Царенков Б. В. Фотоприемник видимого и ультрафиолетового излучения на основе $GaAs_{1-x}P_x$ поверхностно-барьерных структур // ФТП.— 1976.— Т. 10, вып. 8.— С. 1532—1534.
10. Card H. C., Rhoderick E. H. Studies to tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Shottky diodes // J. Phys. D: App. Phys.— 1971.— Vol. 4.— P. 1589—1601.
11. А. с. 383125 СССР. Полупроводниковый фоточувствительный прибор / А. А. Гуткин, М. Д. Дмитриев, Д. Н. Наследов.— 1973.— Б. И. № 23.
12. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств.— М.: Радио и связь, 1991.
13. Беркелиев А., Гольдберг Ю. А., Именков А. Н. и др. Фотоэлектрический метод определения параметров варизонных полупроводников // Изв. АН ТССР. Сер. Физ.-техн. и геолог. науки.— 1986.— Вып. 1.— С. 8—14.
14. Конников С. Г., Мелебаев Д., Рудь В. Ю. и др. Варизонные $Au-GaP_xAs_{1-x}$ структуры и возможности их применения в фотоприемниках ультрафиолетового диапазона // Письма в ЖТФ.— 1993.— Т. 19, вып. 4.— С. 57—64.
15. Гуткин А. А., Дмитриев М. В., Наследов Д. Н., Пашковской А. В. Спектры фоточувствительности поверхностно-барьерного диода $Au-n-GaAs$ в области энергий фотонов 1—5 эВ // ФТП.— 1971.— Т. 5, вып. 10.— С. 1927—1932.
16. Гольдберг Ю. А., Поссе Е. А., Царенков Б. В. Механизм протекания прямого тока в $GaAs$ поверхностно-барьерных структурах (случай невырожденного электронного газа) // ФТП.— 1975.— Т. 9, вып. 3.— С. 513—518.
17. Okumura T., Tu K. N. Electrical characterization of Schottky contacts of Au, Al, Gd and Pt on n-type and p-type $GaAs$ // J. Appl. Phys.— 1987.— Vol. 61 (8)— P. 2955—2961.
18. Конников С. Г., Мелебаев Д., Рудь В. Ю. Исследование зонной структуры полупроводниковых твердых растворов GaP_xAs_{1-x} фотоэлектрическим методом // Письма в ЖТФ.— 1993.— Т. 33.— С. 47—54.
19. Бедный Б. И. О трансформации потенциального барьера на границе $GaAs/Au$ при термообработке // ФТП.— 1999.— Т. 33, вып. 11.— С. 1350—1354.
20. Дмитрук Н. Л., Борковская О. Ю., Конакова Р. В. и др. Влияние гамма-облучения на характеристики фотопреобразования барьерных структур металл—арсенид галлия с текстурированной границей раздела // ЖТФ.— 2002.— Т. 72, вып. 6.— С. 44—49.
21. Мелебаев Д., Мелебаева Г. Д., Рудь Ю. В., Рудь В. Ю. Определение высоты барьера Шоттки $Au-n-GaAs$ фотоэлектрическим методом // Труды VII Международной науч.-практ. конф. «СИЭТ-2006».— Одесса, Украина.— 2006.— С. 165.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Анциферов С. С, Голубь Б. И. Общая теория измерений: Учебное пособие / Под редакцией Н. Н. Евтихьева.— М.: Горячая линия-Телеком, 2007.— 176 с.

Изложены основные положения теоретической метрологии. Рассмотрены методы выявления, оценки и аппроксимации погрешностей результатов измерений. Рассмотрены методы обработки динамических измерений, спектрального анализа и случайных процессов. Основное внимание уделено вопросам математического обеспечения методов обработки результатов многократных измерений и их систематизации.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Стандартизация, сертификация и метрология»; может быть полезно специалистам.



НОВЫЕ КНИГИ

Мишин Г. Т. Современная аналоговая микроэлектроника: теория и практика.— Радиотехника, 2007.— 208 с.

Изложены естественно-научные представления аналоговой микроэлектроники, основой которых являются математическая теория дифференциальных уравнений и систем дифференциальных уравнений в обобщенной форме. Впервые показано, что полномасштабный переход к естественно-научным представлениям позволяет сформировать новый элементный базис; предложить решения для матричных аналоговых больших интегральных микросхем и перепрограммируемых аналоговых интегральных схем; обосновать процедуру синтеза аналоговых электронных цепей. Теоретические выводы сопровождаются практическими примерами.

Предназначена для инженеров, аспирантов и студентов, занимающихся исследованием и разработкой аналоговых систем электроники.



В. К. БУТЕНКО, И. В. ДОКТОРОВИЧ, д. т. н. В. Н. ГОДОВАНЮК,
к. т. н. В. В. РЮХТИН, В. Г. ЮРЬЕВ

Украина, г. Черновцы, ЦКБ "Ритм"
E-mail: rhythmrs@chv.ukrpack.net

Дата поступления в редакцию
10.11 2006 г.

Оппонент к. т. н. Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ
(НПФ "Тензор", г. Черновцы)

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ФОТОДИОДА

Рассмотрены проблемы, возникающие при определении эффективной площади фоточувствительного элемента фотодиодов по стандартизированной методике. Приведена методика с улучшенными метрологическими возможностями.

При определении пороговой чувствительности (Φ_n^*) или обнаружительной способности (D^*) фотоприемника (ФП) учитывается эффективная фоточувствительная площадь ($A_{эф}$) [1, с. 54; 2], которая отличается от геометрической [3, с. 71]. Согласно стандарту [2], площадь определяется фотоэлектрическим методом путем сканирования световым зондом по поверхности фоточувствительного элемента (ФЧЭ) с заданными в технических условиях на фотоприемник размерами. Размеры ФЧЭ определяются как разность координат положения светового зонда, при которых происходит падение фотосигнала до уровня $0,5U_{\max}$ для ФП с прямоугольной формой ФЧЭ и до уровня $0,44U_{\max}$ — для круглых площадок; U_{\max} — максимальное значение фотосигнала при прохождении зондом по ФЧЭ.

При погрешности определения $A_{эф}$, которая не выходит за пределы $\pm 8\%$ [2], такая методика в первом приближении удовлетворяет требованиям на проведение измерений параметров серийных фотоприемников широкого применения, в расчет которых вводится величина эффективной площади. Однако возможности такой методики недостаточны при определении эффективной площади ФП, предназначенных для метрологических целей, для контроля допустимых норм вредных факторов электромагнитного излучения оптического диапазона, для диагностики качества изделий и других случаев с высокими требованиями к метрологическим характеристикам ФП.

Рассмотрим проблемы, которые возникают при определении эффективной площади ФП путем сканирования ФЧЭ световым зондом.

Во-первых, на поверхности фоточувствительного элемента фотоприемника есть контактные площадки. На рис. 1 изображен ФП, на поверхность ФЧЭ которого нанесена непрозрачная контактная площадка 2.

При диаметре ФЧЭ 2 мм и типовых размерах контактной площадки $0,2 \times 0,2$ мм расчеты и сравнение площадей показывают, что контактная площадка за-

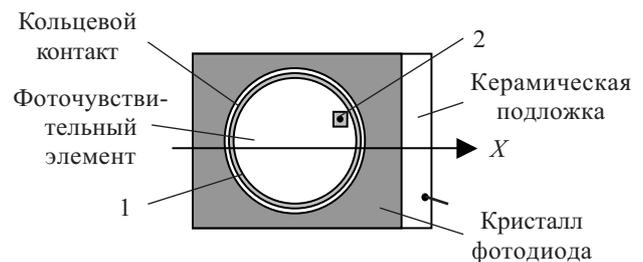


Рис. 1. Вид фотоприемника со стороны фоточувствительного элемента (X — направление сканирования ФЧЭ вдоль оси симметрии):

1 — контактная площадка охранного кольца; 2 — контактная площадка ФЧЭ

нимает 1,3% площади фоточувствительного элемента. Не учитывая этой площади, мы прибавляем к общей относительной погрешности измерений, например чувствительности, погрешность, которая составляет 1,3%. Понятно, что эта погрешность существенно изменится при увеличении диаметра ФЧЭ. Так, для ФП с диаметром ФЧЭ 4 мм погрешность составит приблизительно 0,3%.

При определении эффективной площади ФП может быть допущена существенная случайная погрешность. Поскольку осью симметрии круглого фоточувствительного элемента является его диаметр, то случайно выбрав ось сканирования вдоль диаметра, на котором размещена контактная площадка, можно внести погрешность при определении диаметра, а соответственно, и площади ФЧЭ. В этом случае дополнительная погрешность составит 19,1%. Конечно, такая погрешность относится к разряду промахов, что, тем не менее, свидетельствует о недостатке метода исследования [4, с. 11; 5, с. 7]. После анализа результатов и повторных измерений промах может быть выявлен, а погрешность уменьшится до уровня систематической погрешности, однако не исключено, что промах будет принят за истинный результат измерений.

Во-вторых, для улучшения пороговых свойств и энергетической характеристики чувствительности ФП в конструкцию некоторых фотоприемников вводится контакт в виде кольца. При измерениях параметров ФП в качестве размеров ФЧЭ берут размеры, ограниченные внутренней частью кольцевого контакта. Однако между кольцевым контактом и геометрическим краем ФЧЭ есть зазор в $0,05$ — $0,1$ мм.

На рис. 2 приведена координатная зависимость фотосигнала $I_c = f(X)$. Как видим, на выходе ФП есть фотосигнал с той части ФЧЭ, которая находится за пределами контактной площадки.

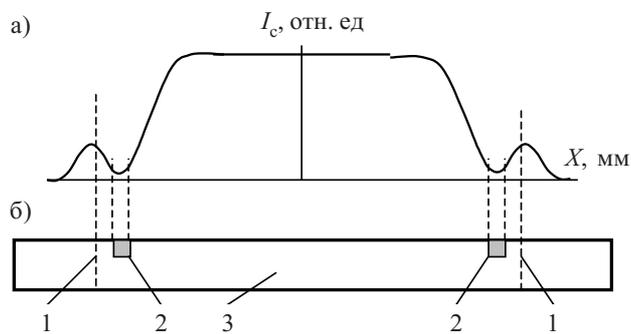


Рис. 2.

a — изменение фотосигнала (I_c) при сканировании ФЧЭ вдоль оси X ; *b* — кристалл ФП в разрезе:
 1 — геометрические пределы ФЧЭ; 2 — контактная площадка ФЧЭ в виде кольца; 3 — кристалл ФП

Конечно, амплитуда фотосигнала, а соответственно, и дополнительная погрешность при определении эффективной площади ФП, зависят от размеров ФЧЭ и светового зонда. Так, при сканировании зондом 0,1 мм фоточувствительных элементов диаметром 2—10 мм дополнительная погрешность составит 2—5%. Таким образом, дополнительную погрешность необходимо определять для конкретного типа фотоприемника и учитывать при расчете основной погрешности измерений $A_{эф}$.

В-третьих, фотоприемники, в первую очередь фотодиоды, за геометрическими пределами фоточувствительного элемента чувствительны к падающему потоку излучения. Это явление всегда имеет место, если не затемнять кристаллы за пределами $p-n$ -перехода. Действительно, длина (L) диффузии неосновных носителей заряда (н. н. з.) в зависимости от материала кристалла может быть от 0,015 до 1,0 мм. Поэтому н. н. з., которые генерируются падающим излучением, доходят до $p-n$ -перехода и дают свой вклад в фототок. Понятно, что чем больше значение L , тем больше вклад периферийной чувствительности.

Кроме этого, при создании $p-n$ -перехода вносится примесь, и это уменьшает чувствительность за счет рекомбинации на примесных центрах. На рис. 2 показана координатная зависимость фотосигнала кремниевых фотодиодов типа ФД255. Хотя уровень фотосигнала за пределами ФЧЭ значительно ниже, чем сигнал в пределах его геометрических размеров, однако при засветке всей поверхности фотоприемника получим 2—4% дополнительного сигнала, что приводит к завышению результатов измерения параметра.

Следует отметить, что периферийная чувствительность может незначительно отличаться от чувствительности в пределах чувствительного элемента. Так, в германиевом фотодиоде ФД-287 с концентрацией примеси в области $p-n$ -перехода $\approx 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и $L=0,1$ мм периферийная чувствительность приблизительно равна чувствительности в пределах ФЧЭ, и дополнительный сигнал приводит к еще большему увеличению результатов измерений. Для прецизионных измерите-

лей световых величин такая дополнительная погрешность является недопустимо большой.

Иногда от периферийной чувствительности избавляются путем металлизации площади за пределами ФЧЭ. Однако такой технологический прием также не решает проблемы улучшения точности определения $A_{эф}$, т. к. возникает другая проблема — появляется многократное переотражение излучения между металлическим покрытием и входным окном. Чернение такого покрытия или использование черненной диафрагмы значительно повышает стоимость изделия.

Наконец, четвертое. Эффективная фоточувствительная площадь ФП это, по определению, площадь ФЧЭ, эквивалентного по фотосигналу ФП, чувствительность которого *равномерно* распределена по ФЧЭ и равна номинальному значению локальной чувствительности данного ФП [6]. Однако ФП имеют некоторую (иногда высокую) неравномерность чувствительности по поверхности ФЧЭ, которая является следствием локальных дефектов кристалла и поверхности ФП. Понятно, что определение эффективной площади ФП усложняется. В этом случае проводится сканирование световым зондом по всей поверхности ФЧЭ и определяется величина эффективной фоточувствительной площади ($A_{эф}$) по формуле [6]

$$A_{эф} = \frac{1}{S_N(x_0, y_0)} \iint_A S(x, y) dx dy,$$

где S_N — номинальное значение локальной чувствительности — как правило, выбирается максимальная чувствительность точки в центре ФЧЭ (точка x_0, y_0);
 $S(x, y)$ — чувствительность ФП при облучении ФЧЭ точечным зондом с координатами x, y .

Отметим, что такая методика является малопродуктивной и сложной при обработке результатов.

Таким образом, с учетом рассмотренных дополнительных погрешностей, исключая промахи, к погрешности определения $A_{эф}$, которая составляет $\pm 8\%$, добавится погрешность в 6—8%.

В отличие от вышеописанной стандартизированной методики измерения эффективной площади с ее недостатками, предлагается методика, которая основана на методе сравнения площадей. Структурная схема установки для такого измерения $A_{эф}$ приведена на рис. 3.

Для применения данной методики в плоскости фоточувствительного элемента ФП формируется равномерное световое поле с размерами, в 2—3 раза большими, чем больший из размеров ФЧЭ. Равномерность потока излучения достигается изменением расстояния между ФП и источником излучения. Так, при

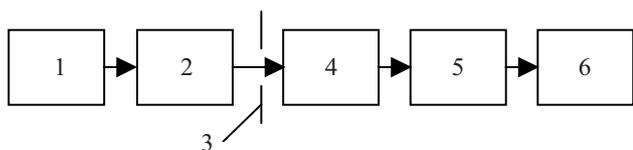


Рис. 3. Структурная схема установки для измерения эффективной площади ФП:

1 — блок питания источника оптического излучения; 2 — источник оптического излучения; 3 — диафрагма; 4 — фотоприемник; 5 — преобразователь "ток—напряжение"; 6 — вольтметр типа В7-28

использовании в качестве источника излучения лампы накаливания типа РН12-100 на расстоянии, больше 1 м, неравномерность освещенности участка диаметром 45 мм не превышает $\pm 1\%$.

Так как выходной фотосигнал фотоприемника пропорционален площади фоточувствительного элемента, то, установив перед входным окном ФП диафрагму толщиной 0,3—0,5 мм и размерами, в 1,3—1,4 раза меньшими геометрических размеров ФЧЭ, получим усредненное значение фотосигнала I_d . В этом случае учитывается влияние неравномерности чувствительности по поверхности ФЧЭ.

На рис. 4 схематически показано положение диафрагмы 1 при засветке ФП 2 потоком излучения Φ .

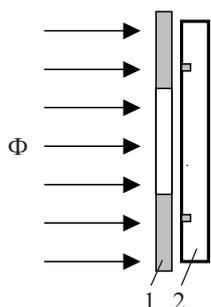


Рис. 4. Засветка ФП потоком излучения Φ при измерении эффективной площади методом сравнения: 1 — диафрагма; 2 — кристалл ФП

Если эффективная фоточувствительная площадь ФП — это площадь ФЧЭ, эквивалентного по фотосигналу ФП, чувствительность которого *равномерно* распределена по ФЧЭ, то сняв диафрагму, мы получим фотосигнал $I_{ФП}$ именно такого, эквивалентного по фотосигналу, фотоприемника. Другими словами, при измерении таким способом фотосигнала $I_{ФП}$ учитывается влияние контактной площадки и чувствительности за геометрическими пределами ФЧЭ на результат определения $A_{эф}$.

Величина эффективной фоточувствительной площади $A_{эф}$ определяется здесь соотношением

$$A_{эф} = A_d \frac{I_{ФП}}{I_d},$$

где A_d — площадь диафрагмы.

С учетом того, что площадь диафрагмы может быть определена с погрешностью не более $\pm 0,5\%$, фотосигналы — с погрешностью не более $\pm 1\%$, общая погрешность измерений эффективной площади не выйдет за пределы $\pm 1,5\%$.

Необходимо отметить, что настоящая методика имеет также и ограничения — сложно определить A_d фотоприемников с размерами ФЧЭ, меньшими 1 мм, т. к. сложно качественно изготовить диафрагму, точно определить ее площадь и выставить над фоточувствительным элементом фотоприемника.

Выводы

С учетом анализа причин увеличения общей погрешности измерений эффективной площади фоточувствительного элемента фотодиода по стандартизированной методике разработана методика, основанная на сравнении площадей ФЧЭ и специальной диафрагмы.

Предложенная методика позволяет проводить измерения эффективной площади фоточувствительного элемента фотодиодов с меньшей общей погрешностью измерений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Васильченко Н. В., Борисов В. А., Кременчугский Л. С., Левин Г. Э. Измерение параметров приемников оптического излучения. — М.: Радио и связь, 1983.
2. ГОСТ 17772–88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик.
3. Йесперс П., Ван де Виле Ф., Уайт М. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения. — М.: Мир, 1979.
4. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин. — Л.: Наука, 1974.
5. Чепуренко В. Г., Нижник В. Г., Соколова Н. И. Вычисления погрешностей измерений. — К.: Вища школа, 1978.
6. ГОСТ 21934–83. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Заводян А. В., Грушевский А. М. Поверхностный монтаж для производства высокоплотных электронных средств: Уч. пособие. — М.: МИЭТ, 2006. — 276 с.

Рассмотрены основные аспекты перспективного направления в разработке и производстве электронных средств — техники поверхностного монтажа компонентов на коммутационных платах, реализуемой в условиях компьютерно-интегрированных технологических процессов. Внимание акцентировано на новых технологических разработках, в том числе отдельных научно-исследовательских разработках кафедры микроэлектроники МИЭТ, имеющих практическую направленность, а также на вопросах обеспечения качества и эксплуатационной надежности электронных устройств.

Рекомендуется студентам, обучающимся по специальностям «Проектирование и технология электронных средств»; «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств»; «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети»; «Радиоэлектронные системы»; «Электроника и микроэлектроника»; «Микроэлектроника и твердотельная электроника» и смежным с ними, а также специалистам, занимающимся созданием перспективных электронных устройств с высокоплотным монтажом.



К. ф.-м. н. В. Н. КАТЕРИНЧУК, М. З. КОВАЛЮК,
к. ф.-м. н. О. С. ЛИТВИН

Украина, г. Черновцы, ЧО Ин-та проблем материаловедения
им. И. Н. Францевича; г. Киев, Ин-т физики
полупроводников им. В. Е. Лашкарёва
E-mail: chimsp@ukrpost.ua

Дата поступления в редакцию
11.01 2007 г.

Оппонент д. х. н. В. Н. ТОМАШИК
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ПОВЕРХНОСТНЫЕ НАНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОКИСЛЕНИИ СЛОИСТЫХ КРИСТАЛЛОВ SnS_2

Наноскопический анализ окисленной поверхности кристаллов SnS_2 указывает на образование наноигол высокой плотности.

Свойства полупроводниковых материалов в массивном состоянии могут существенно изменяться при их наноструктурировании. Наиболее часто наноструктурирование на полупроводниковых подложках происходит при формировании на их поверхности слоев других веществ. При этом могут проявиться новые квантово-размерные эффекты, что дает возможность формирования нанoeлектронных приборов [1, 2].

Одним из качественных типов подложек для создания гетероструктур являются кристаллы со слоистым строением [3—5], которые легко скалываются механически вдоль плоскостей спайности и характеризуются наличием зеркальной поверхности скола. Обычно скол кристалла проявляет инертные свойства в окружающей среде.

Наиболее простым способом наращивания другой фазы на полупроводниковой подложке является ее окисление. В данной работе методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследованы поверхностные свойства неокисленных и окисленных кристаллов SnS_2 .

Эксперимент

Образцы кристаллов дисульфида олова выращивали методом химических транспортных реакций в двухсекционной печи с соответствующим градиентом температуры. В высокотемпературную область печи помещали синтезированное вещество — SnS_2 , а в другой части ампулы, которая находилась при более низкой температуре, выращивались сами кристаллы. Переносчиком вещества служил йод.

Кристаллы получали в виде тонких пластин, хаотически расположенных по ампуле и ее стенкам, причем максимальные размеры пластин составляли приблизительно 1 см^2 , а их толщина колебалась в пределах 5—100 мкм. Такие пластины характеризовались зеркальной поверхностью.

После выращивания пластины окисляли на воздухе в печи с регулируемой и стабилизированной температурой. Температура окисления образцов составляла 400°C , а время окисления — 4 ч.

Исследование топологии поверхности образцов до и после окисления осуществляли при помощи атом-

но-силового микроскопа типа Nanoscope IIIa Dimension 3000 SPM (Digital Instruments, USA) в режиме периодического контакта.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1, а показано трехмерное АСМ-изображение неокисленной и неокисленной поверхности SnS_2 . Хорошо видно, что она состоит из полос наслаев вещества, которые имеют ступенчатый характер с шагом ступеньки $\approx 0,345 \text{ нм}$, причем ширина наслаев составляет $\approx 100 \text{ нм}$. Такая картина поверхности обусловлена характером роста самих кристаллов — методом химических транспортных реакций. Она свидетельствует о том, что формирование кристалла из отдельных молекул SnS_2 во время роста не имеет плоскостного характера. Эту особенность поверхности кристаллов необходимо учитывать при подготов-

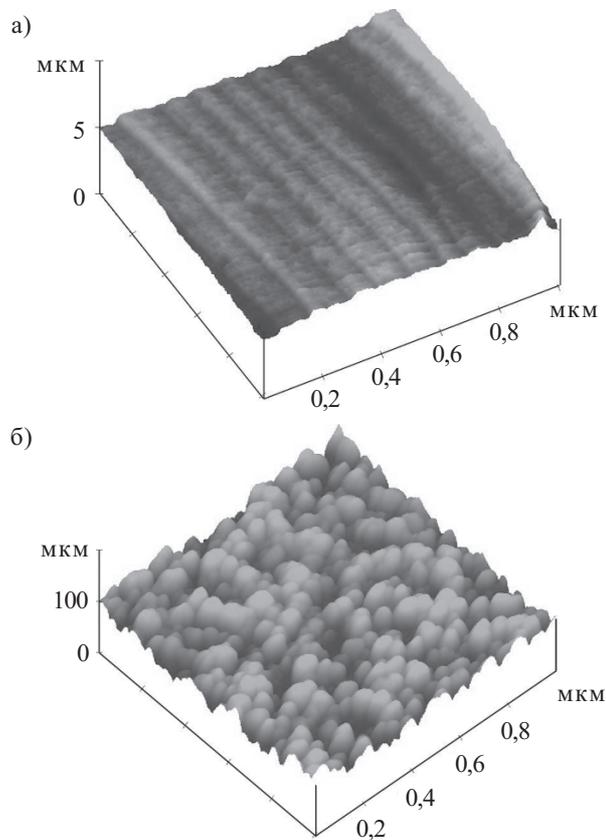


Рис. 1. АСМ-изображение неокисленной (а) и окисленной (б) поверхности SnS_2

ке подложек из SnS_2 с целью приготовления гетероструктур.

Продолжительность и температура процесса окисления кристаллов могут существенно влиять на топографию окисленной поверхности, причем эти два фактора можно выбирать произвольно.

Окисление кристаллов при 400°C проводили с целью содействия образованию оксидной пленки SnO_2 . Известно, что эта температура способствует формированию пленок SnO_2 и другими методами, например пиролизом [6].

Проведенные экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что при окислении кристаллов SnS_2 происходит быстрое наращивание оксида, о чем свидетельствует окрашивание поверхности в другой оттенок, отличающийся от первоначального. Энергия химических связей Sn-S мала, и получаемой тепловой энергии достаточно для их быстрого разрыва.

Отметим, что отдельные слои кристалла представляют собою три моноатомных плоскости в последовательности S-Sn-S . При окислении образуются как оксиды серы, так и оксид типа SnO_2 . Летучие соединения серы легко удаляются, в результате чего на поверхности кристалла остается только пленка диоксида олова.

На рис. 1, б показано трехмерное АСМ-изображение окисленной поверхности кристалла, откуда хорошо видно, что она не является плоской, а преобразуется в плотную совокупность наноигл, ориентированных перпендикулярно к плоскости. Главной причиной появления наноструктурированной поверхности в процессе формирования гетероструктуры является расхождение параметров кристаллических решеток SnS_2 и образующегося диоксида олова. Плотность наноигл составляет $\approx 200\text{--}250 \text{ мкм}^{-2}$, а их высота не превышает 30 нм.

Подтверждением формирования nanoобразований на окисленной поверхности SnS_2 в форме наноигл может служить также анализ поперечного сечения рассматриваемой поверхности, которое показано на рис. 2. Видно, что nanoобразования заострены и напоминают наноиглы. Максимальные значения высот и впадин поверхности составляют соответственно $(25 \dots 30)$ и -30 нм, а средние размеры диаметра оснований таких наноигл составляют $40\text{--}50$ нм.

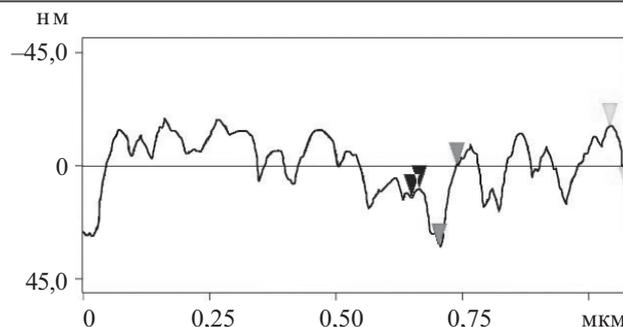


Рис. 2. Вертикальное сечение окисленной поверхности SnS_2

Выводы

Исследование неокисленной и окисленной поверхности SnS_2 с помощью атомно-силовой микроскопии позволило обнаружить ее наноструктурирование. Неокисленная поверхность имеет nanoобразования в форме ступенчатых нанополос, а окисленная — в виде плотной совокупности наноигл. Средние размеры нанополос составляют 100 нм, высота наноигл достигает значений $25\text{--}30$ нм, а диаметр их основания — $40\text{--}50$ нм.

Выявленные особенности поверхности необходимо учитывать при формировании гетероструктур и при физических исследованиях структур "оксид—полупроводник".

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Bettotti P., Cazzanelli M., Dal Negro L. et al. Silicon nanostructures for photonics // *J. Phys.: Condens. Matter.*— 2002.— Vol. 14, N 35.— P. 8253—8281.
2. Pavesi L. Routes toward silicon-based lasers // *Materials Today.*— 2005.— Vol. 8, N 1.— P. 18—25.
3. Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З. Фотоэлектрические параметры гетеропереходов $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x\text{-InSe}$ ($0 \leq x \leq 1$) // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.*— 2006.— № 2.— С. 41—42.
4. Katerinchuk V. N., Kovalyuk M. Z. Photoelectric properties of $n\text{-SnS}_2\text{-}p\text{-InSe}$ heterojunction // *J. Advanced Materials.*— 1997.— Vol. 4, N 1.— P. 40—43.
5. Катеринчук В. М., Ковалюк М. З. Вплив інверсійного шару на електричні властивості гетеропереходу $n\text{-SnS}_2\text{-}p\text{-InSe}$ // *Укр. фіз. ж.*— 1993.— Т. 38, № 2.— С. 259—262.
6. Dawar A. L., Joshi J. C. Review. Semiconducting transparent thin films: their properties and applications // *J. Mater. Sci.*— 1984.— Vol. 19, N 1.— P. 1—23.

в портфеле редакции в портфеле

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Направленная кристаллизация силицидных пленок на кремнии. (Украина, г. Киев)
- Расчет коэффициента преобразования кондуктометрического датчика биосенсора. (Украина, г. Киев)
- Технология изготовления автоэмиссионных кремниевых катодов субмикронных размеров. (Украина, г. Львов)
- Технология ультразвуковой очистки оптико-механических систем. (Беларусь, г. Минск)



- Датчики ускорений и силы инерции и тяготения. (Украина, г. Киев)
- Электронные приборы на основе полупроводников. (Россия, г. Москва)
- Тонкопленочные элементы кремниевых диодов Шоттки для высокотемпературного микромонтажа. (Беларусь, г. Минск)
- Ультрафиолетовые поверхностно-барьерные структуры для сенсоров пламени. (Украина, г. Киев)
- Датчики давления криогенных сред. (Украина, г. Львов)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле

К. т. н. В. И. БОСЫЙ, Н. Г. ДАНИЛОВ, В. П. КОХАН,
В. А. НОВИЦКИЙ, к. ф.-м. н. Е. М. СЕМАШКО, В. В. ТКАЧЕНКО,
Т. А. ШПОНЯК

Дата поступления в редакцию
13.03 2007 г.

Украина, г. Киев, Научно-производственное предприятие "Сатурн"
E-mail: jssaturn@kiev.ua

Оппонент к. т. н. В. Н. ИВАНОВ
(НИИ "Орион", г. Киев)

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЗРАЧНЫХ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К *p*-GaN ДЛЯ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

*Получены омические контакты к *p*-GaN с удельным контактным сопротивлением $(1...2) \cdot 10^{-3}$ Ом·см² и коэффициентом прозрачности 78% на длине волны 460 нм.*

Светоизлучающие диоды (СИД) представляют собой полупроводниковые приборы, которые преобразуют электрическую энергию непосредственно в свет. При этом для получения электромагнитного излучения используется эффект излучательной рекомбинации в прямо смещенном *p-n*-переходе. В настоящее время полупроводниковые СИД по своим характеристикам превосходят традиционные источники света. Они уже начинают заменять лампы накаливания, в частности в тех случаях, когда требуется долговечность, компактность, отсутствие нагрева и/или направленность (например светофоры, автомобили, дисплеи и т. п.) [1].

Для изготовления СИД используются многослойные эпитаксиальные гетероструктуры на основе широкозонных полупроводников, в частности нитрида галлия. Улучшение оптических и электрических характеристик таких приборов связано как с дальнейшим развитием технологии выращивания полупроводниковых гетероструктур, так и с совершенствованием технологии изготовления прибора. Важное значение для улучшения параметров СИД имеет снижение сопротивления омических контактов.

Известно, что создание омических контактов к *n*-области диода не представляет значительных трудностей [2, 3]. Формирование же омических контактов к *p*-GaN с низким удельным сопротивлением и высокой прозрачностью в рабочей области спектра — достаточно сложная задача из-за отсутствия металла с высокой работой выхода и из-за ограничений в легировании *p*-области GaN. Несмотря на то, что предельная растворимость Mg в GaN составляет $\approx 5 \cdot 10^{19}$ см⁻³, концентрация носителей заряда в поверхностном слое GaN обычно на два порядка ниже [4]. Кроме того, к снижению концентрации носителей заряда может приводить остаточный водород, накапливающийся в поверхностном слое *p*-GaN в процессе эпитаксиального выращивания. В результате этого концентрация свободных носителей в поверхностном слое ниже, чем в объеме.

Для получения воспроизводимых омических контактов с требуемыми характеристиками исследовано

множество схем металлизации. Были исследованы такие металлы как Au, Ni, Ti, Pd, Pt, Au/Ni, Au/Pt, Au/Cr, Au/Pd, Au/Mg/Au, Au/Pt/Pd, Au/Cr/Ni, Au/Pt/Ni, Au/Ni/Pt и др. Наиболее широко для омических контактов к *p*-GaN используется система Ni/Au, причем не только в светоизлучающих диодах, но и в экспериментальных образцах лазерных диодов, в которых требования к омическим контактам еще более жесткие. Удельное контактное сопротивление для многих контактных систем обычно находится в пределах $2,1 \cdot 10^{-2}—9,6 \cdot 10^{-4}$ Ом·см² [5—7]. При этом следует отметить, что результаты исследований омических контактов к *p*-GaN, опубликованные различными авторами, часто весьма противоречивы. Расхождения в полученных результатах могут быть связаны с различиями в условиях эксперимента.

В данной работе приведены результаты исследований омических контактов на основе пленок Ni—Au к *p*-области нитрида галлия. Для изучения физико-химических процессов и оптимизации режимов формирования омических контактов проведены исследования влияния толщины слоев Ni и Au, условий нанесения и формирования контакта на удельное контактное сопротивление и оптические свойства контактной системы. Проведены также исследования перераспределения элементов в структурах "металл—полупроводник" с помощью метода электронной оже-спектроскопии.

В качестве исходных образцов использовали эпитаксиальные структуры *p*-GaN толщиной ≈ 2 мкм с концентрацией носителей заряда $(5...6) \cdot 10^{17}$ см⁻³, выращенные на сапфировых подложках.

Формирование тестовых структур для исследований омических контактов проводили осаждением металлических слоев Ni и Au с последующей взрывной литографией. Непосредственно перед нанесением металлов поверхность полупроводника обрабатывали в растворе HCl:H₂O=1:1 в течение 5 мин с целью удаления собственного окисла. Пленки Ni и Au нанесли последовательно методом электронно-лучевого испарения в вакуумной системе со стартовым давлением не выше $3 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. После металлизации образцы подвергали термообработке в нейтральной или окислительной среде при температурах в диапазоне 350—550°C.

Для определения удельного контактного сопротивления ρ_c омических контактов использовали метод длинной линии, описанный в работе [8]. Были изго-

товлены образцы с круглыми контактами радиусами $r_0=120$ мкм, $r_1=133,0; 148,5; 158,3; 168,2; 178,4$ и $188,3$ мкм.

Распределение элементов в образцах исследовали методом электронной оже-спектроскопии с помощью анализатора поверхности LAS-2000 фирмы «Riber» с использованием спектрометра типа «цилиндрическое зеркало». Спектры регистрировали с энергетическим разрешением 3,4 эВ.

Для измерений коэффициента прозрачности пленки Ni и Au напыляли на стекла для фотопластинок в одном технологическом цикле с образцами для электрофизических измерений. Коэффициент прозрачности металлических слоев измеряли с помощью спектрофотометра СФ-26 в диапазоне длин волн 450—700 нм с абсолютной погрешностью измерения длины волны не более 0,25%.

После формирования тестовых образцов определяли их вольт-амперные характеристики (ВАХ). Непосредственно после осаждения пленок Ni–Au ВАХ образцов были нелинейными, что свидетельствует о формировании барьерного перехода. Выпрямляющий характер ВАХ не изменялся и после термообработки в атмосфере азота во всем диапазоне температур. Однако ВАХ становились линейными после термообработки на воздухе в диапазоне температур 400—550°C в течение 10 мин. ВАХ образцов, отожженных на воздухе при температуре ниже 400°C, были нелинейными. При термообработке на воздухе менее 10 мин вольт-амперные характеристики были нестабильными. Причиной этого могло быть неполное или неоднородное окисление Ni.

Необходимо отметить, что при напылении одной лишь пленки Ni и отжиге ее на воздухе при температуре 500°C пленка из проводящей превращалась в изолирующую, но более прозрачную, что свидетельствует об окислении Ni и образовании NiO. Аналогичные результаты получены в работе [6].

На рис. 1 представлены ВАХ образцов с контактами Ni(50 Å)/Au(50 Å) после термообработки на воздухе. В таблице приведены результаты измерений удельного контактного сопротивления исследованных образцов с разной толщиной пленок Ni и Au и разными режимами термообработки.

Приведенные результаты свидетельствуют о сильной зависимости удельного сопротивления и от толщины слоев металлов, и от температуры термообра-

Результаты исследований омических контактов к p-GaN

Металлы (толщина слоев, Å)	Условия термообработки	Удельное контактное сопротивление, Ом·см ²
Ni/Au (100/100)	550°C, N ₂	Нелинейные ВАХ
Ni/Au (50/50)	Без термообработки	Нелинейные ВАХ
	550°C, воздух	$\approx 1,6 \cdot 10^{-2}$
Ni/Au (100/50)	350°C, воздух	Нелинейные ВАХ
Ni/Au (80/50)	500°C, воздух	$\approx 8 \cdot 10^{-2}$
Ni/Au (50/50)	500°C, воздух	$\approx 9 \cdot 10^{-3}$
Ni/Au (50/100)	500°C, воздух	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$

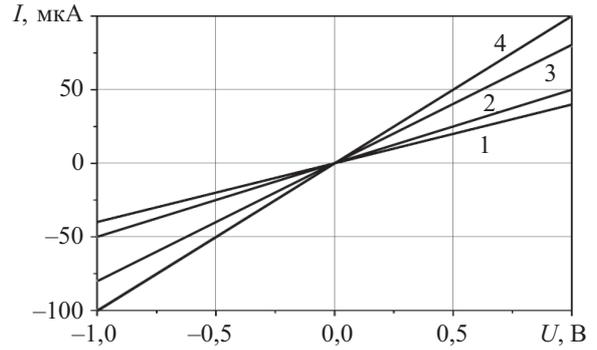


Рис. 1. Влияние термообработки в атмосфере воздуха на ВАХ образцов контактов Ni(50 Å)/Au(50 Å) к p-GaN: 1 — 400°C; 2 — 450°C; 3 — 550°C; 4 — 500°C

ботки. Минимальные значения удельного контактного сопротивления $(1...2) \cdot 10^{-3}$ Ом·см² получены на образцах с толщиной слоев Ni и Au 50 Å и 100 Å, соответственно, после отжига на воздухе в течение 10 мин при температуре 500°C.

На рис. 2 и 3 представлено распределение элементов в образцах контактов Au(50 Å)/Ni(50 Å)/p-GaN непосредственно после напыления металлов и после термообработки. В исходном образце (рис. 2) четко видны слои золота и никеля и элементы полупроводниковой подложки. При этом количество кислорода в слоях минимально. Термообработка (рис. 3) приводит к интенсивному взаимодействию в систе-

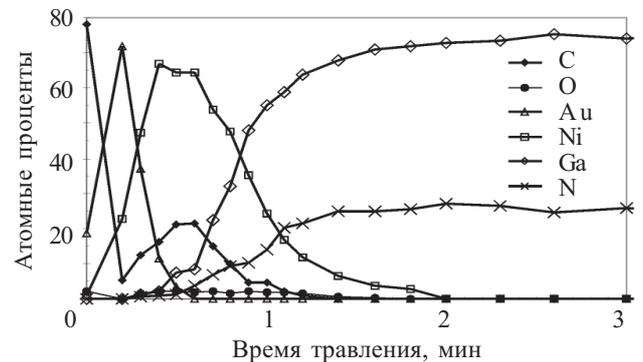


Рис. 2. Распределение элементов в исходной структуре (Au/Ni)/GaN, полученное методом электронной оже-спектроскопии с послойным травлением

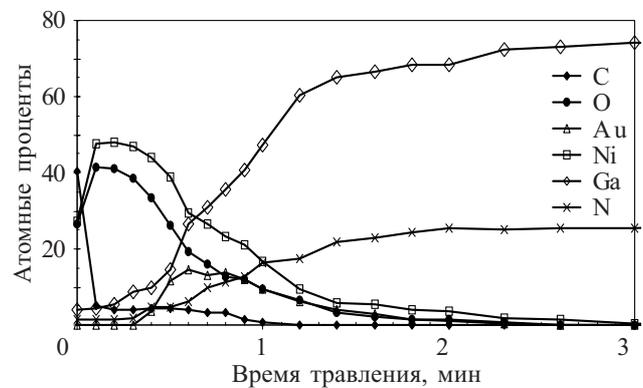


Рис. 3. Распределение элементов в образце (Au/Ni)/GaN после термообработки на воздухе при температуре 500°C в течение 10 мин, полученное методом электронной оже-спектроскопии с послойным травлением

ме "металл—полупроводник". Золото диффундирует к границе раздела "металл—полупроводник", а галлий диффундирует к поверхности металлического слоя. Кроме того, важно отметить, что в приповерхностном слое образца резко увеличивается содержание кислорода. При этом профиль распределения никеля, что свидетельствует об окислении никеля в процессе термообработки.

Как было указано выше, омические контакты к *p*-области для светоизлучающих диодов должны обладать высокой оптической прозрачностью в рабочем диапазоне спектра. На рис. 4 приведены зависимости коэффициента пропускания от длины волны для исходного образца (кривая 1) и после отжига при температуре 500°C в течение 10 мин (кривая 2). Коэффициент прозрачности металлических слоев Ni/Au на длине волны 460 нм непосредственно после напыления металлических слоев составляет ≈40% и возрастает после отжига до ≈78%, что практически совпадает с результатами, полученными другими авторами [5—7]. Точность измерения не хуже ±1%.

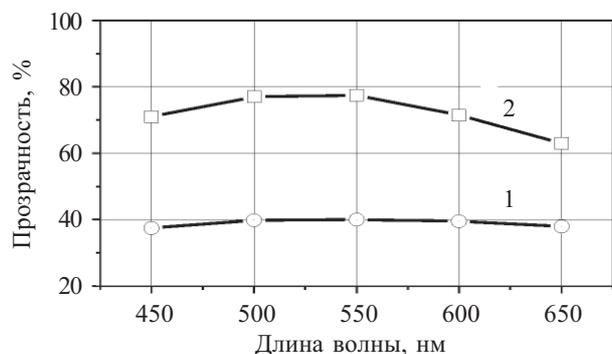


Рис. 4. Зависимость коэффициента прозрачности от длины волны для исходного образца (1) и после отжига при температуре 500°C в течение 10 мин (2)

Снижение удельного контактного сопротивления омических контактов в процессе термообработки некоторые авторы связывают с формированием в поверхностном слое *p*-GaN вакансий галлия, которые действуют как акцепторы и, следовательно, увеличивают концентрацию носителей заряда на границе раздела "металл—полупроводник" [5, 9]. Однако исследования [10] показали, что вакансии Ga в GaN *p*-типа нестабильны. Возможно образование комплексных дефектов с водородом ($V_{Ga}H_2$), дефектов замещения Ni и Au в GaN. Комплексы дефектов $V_{Ga}-Au_i$, V_N и $Ni_{Ga}-V_N$ имеют достаточно низкие энергии формирования и действуют в GaN как глубокие акцепторы. При этом они не дают заметного вклада в концентрацию носителей заряда в *p*-GaN, но могут действовать как компенсирующие центры в *n*-GaN. Поэтому улучшение свойств омических контактов Au/Ni к *p*-GaN не может быть объяснено образованием этих комплексов.

Улучшение свойств омических контактов на основе Ni/Au при отжиге в окислительной среде наблюдали в работе [6]. В работе [7] показано, что отжиг в окислительной среде снижает контактное сопротивление на порядок. Это позволяет предположить, что

создание низкоомного контакта связано с формированием *p*-NiO в присутствии Au. Без пленки золота контакт *p*-GaN/*p*-Ni неомический.

Улучшение линейности ВАХ и снижение удельного контактного сопротивления в результате термообработки могут быть объяснены формированием более тесного контакта и образованием промежуточных фаз с более высокой работой выхода и дополнительным легированием приповерхностного слоя полупроводника. Авторы работы [6] полагают, что в процессе термообработки в окислительной среде образуются переходы Au/*p*-NiO и *p*-NiO/*p*-GaN. Такие переходы могут изменять ход потенциала в приповерхностной области структуры и преобладающий механизм переноса тока. Кроме того, Au может способствовать уменьшению объемного удельного сопротивления системы Au-NiO. Однако для получения необходимых данных по плотности и энергетическому распределению состояний и для анализа зонной диаграммы такой системы необходимы дальнейшие исследования.

Таким образом, проведенные исследования показали, что на основе системы Ni/Au можно создавать омические контакты к *p*-области GaN с приемлемыми для создания светоизлучающих диодов характеристиками. Отжиг образцов контактов *p*-GaN/Ni(50 Å)/Au(100 Å) при температуре 500°C в окислительной среде в течение 10 мин позволяет получать омические контакты с удельным контактным сопротивлением примерно $(1...2) \cdot 10^{-3}$ Ом·см² и прозрачностью 78% на длине волны 460 нм.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Alferov Zh. Nobel lecture/ Reviews of Modern Physics.— 2002.— Vol. 73, N 3.
2. Mohammad S. N. Contact mechanisms and design principles for alloyed ohmic contacts to *n*-GaN // J. Appl. Phys.— 2004.— Vol. 95, N 12.— P. 7940—7953.
3. Motayed A., Davydov A. V., Boettinger W. J. et al. Realization of improved metallization-Ti/Al/Ti/W/Au ohmic contacts to *n*-GaN for high temperature application // Phys. Stat. Sol.— 2005.— Vol. C2, N 7.— P. 2536—2539.
4. DenBaars S. P. Gallium nitride materials technology // www.wtec.org/loyola/ttec/hte_e/report/hte-chap3.pdf
5. Jong K. K., Jung H. J., Jong-Lam L. et al. Microstructural investigation of Ni/Au ohmic contact on *p*-type GaN // J. Electrochem. Soc.— 2000.— Vol. 147, N 12.— P. 4645—4651.
6. Narayan J., Wang H., Oh T.-H. et al. Formation of epitaxial Au/Ni/Au ohmic contacts to *p*-GaN // Appl. Phys. Lett.— 2002.— Vol. 81, N 18.— P. 3978—3980.
7. Ho W. J., Jong-Lam L. Transparent ohmic contacts of oxidized Ru and Ir on *p*-type GaN // J. Appl. Phys.— 2003.— Vol. 93, N 9.— P. 5416—5421.
8. Marlow G. S., Das M. B. The effects of contact size and non-zero metal resistance on the determination of specific contact resistance // Solid-State Electronics.— 1982.— Vol. 25, N 2.— P. 91—94.
9. Seung Wan Chae, Joon Seop Kwak, Suk Kil Yoon et. al. Characteristics of hydrogen storage alloy *p*-GaN ohmic contacts for InGaN LEDs // Journal of the Korean Physical Society.— 2006.— Vol. 49, N 3.— P. 899—902.
10. Von Pezold Jo., Bristowe P. D. Metal (Ni, Au)-vacancy complexes in GaN // www.msm.cam.ac.uk/asp/metal_vacancy_ICNS_poster.pdf

К. т. н. В. М. БАТУРКИН, к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО,
Д. М. ГАЛЯУТДИНОВ, И. Т. ВЛАДИМИРОВ

Украина, г. Киев, НТУУ «Киевский политехнический ин-т»,
г. Харьков, НИИ радиотехнических измерений
E-mail: nikol@industry.gov.ua

Дата поступления в редакцию
28.04 2007 г.

Оппонент В. М. МАРКУС
(НИИ "Шторм", г. Одесса)

ЭФФЕКТИВНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ МОЩНОГО СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО МИКРОЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА

Предложена система охлаждения модифицированного сверхвысокочастотного микроэлектронного блока с целью увеличения рабочей мощности транзистора до 51,5 Вт.

При разработке микроэлектронных блоков в герметичном исполнении по-прежнему актуальной остается проблема обеспечения нормальных тепловых режимов.

Целью настоящего исследования явилась разработка эффективной системы охлаждения мощного сверхвысокочастотного микроэлектронного блока, модификация которого привела к увеличению мощности, рассеиваемой транзистором. При этом максимально должны быть сохранены отработанные конструктивно-технологические решения и габаритные размеры базового варианта блока (см. рис. 1, а).

Основным тепловыделяющим элементом усилительного модуля, критичным в тепловом отношении, является сверхвысокочастотный транзистор типа FLL 2001В-3, который рассеивает 27 Вт потребляемой мощности. При температуре окружающей среды 40°C (313 К) температура корпуса транзистора близка к предельно допустимой. Напряженность теплового режима обусловлена тем, что теплота от основания

транзистора размерами 11×21 мм отводится к корпусу блока, а от него к корпусу изделия, в основном теплопроводностью через ряд металлических конструктивных элементов и контактных соединений, обладающих значительным термическим сопротивлением. Контактная поверхность блока с изделием имеет размеры 0,196×0,181 м. Высота блока — 0,064 м. Теплота от изделия в целом отводится излучением, конвекцией при давлении воздуха 3·10⁴ Па и контактным теплообменом на посадочное место изделия.

Разработанная система охлаждения транзистора предусматривает снижение контактных термических сопротивлений, повышение изотермичности контактной поверхности корпуса блока путем встраивания в его днище трех плоских тепловых труб (ТТ, см. рис. 1, б) и дополнительный отвод теплоты от транзистора с помощью теплопроводной шины и ТТ сложной формы (см. рис. 1, б, в). Теплопроводная шина установлена сверху корпуса транзистора с обеспечением теплового контакта. В ее отверстие запаяна зона нагрева ТТ сложной формы, конденсационные зоны которой (отогнутые концы ТТ) припаяны к внутренней поверхности корпуса блока.

Для оценки эффективности разработанной системы охлаждения было проведено расчетное и физическое моделирование процессов теплопередачи в разработанной системе.

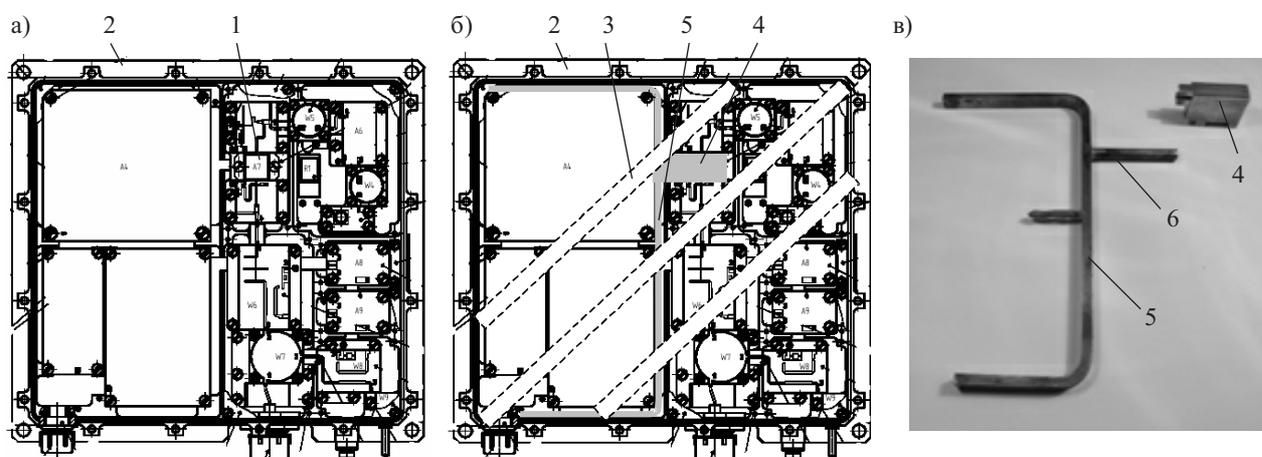


Рис. 1. Конструкция микроэлектронного блока — базовый вариант (а); модифицированный вариант (б); теплопередающие элементы блока (в):

1 — транзистор; 2 — корпус блока; 3 — плоская ТТ; 4 — теплопроводная шина; 5 — ТТ сложной формы; 6 — зона нагрева ТТ

Расчетное моделирование тепловых режимов

В состав объекта моделирования входят (рис. 2) посадочное место изделия, корпус блока, плата усилительного модуля, корпус транзистора и основание транзистора, а также остальные тепловыделяющие компоненты блока (не показаны на рисунке).

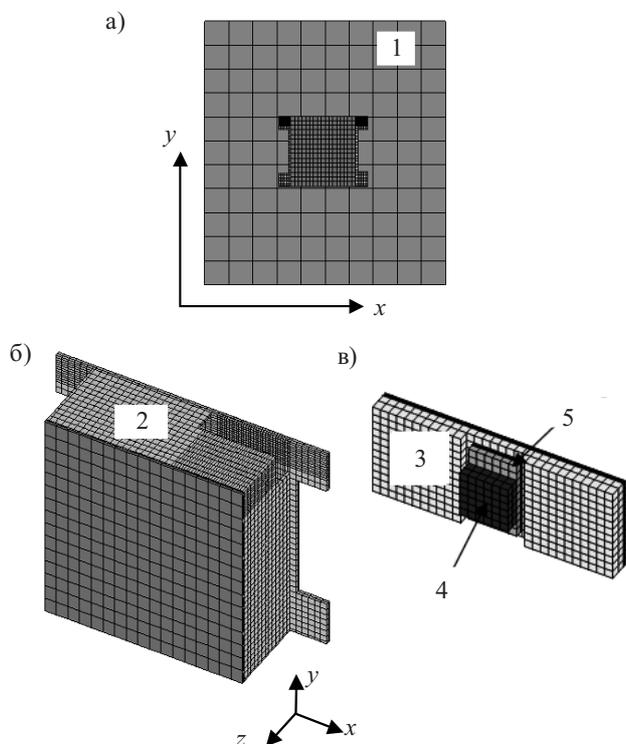


Рис. 2. Основные элементы трехмерного моделирования — установка блока на посадочном месте изделия (а); модель корпуса блока (б); плата усилительного модуля и транзистор (в):

1 — посадочное место изделия; 2 — корпус блока; 3 — плата усилительного модуля; 4 — корпус транзистора; 5 — основание (фланец) корпуса транзистора

Для каждого из элементов были составлены и решены уравнения теплопроводности. В общем случае это трехмерные уравнения. Граничными условиями в зонах контакта являлись условия контактного теплообмена, задаваемые соответствующими удельными контактными сопротивлениями.

Перенос тепла, осуществляемого каждой тепловой трубой, учитывался с помощью уравнения теплового баланса, составленного для парового потока, рассматриваемого как изотермический элемент:

$$\sum_{i=1}^N (T_i - T_{\text{пар}}) \cdot F_i / [1/(\alpha_{\text{ТТ},i} \eta_{\text{ТТ},i}) + 1/\alpha_{\text{конт},i}] = 0, \quad (1)$$

где N — количество зон присоединения ТТ к поверхности блока; $T_i, T_{\text{пар}}$ — соответственно температура i -й поверхности, контактирующей с ТТ, и температура пара в ТТ;

F — площадь поверхности контакта;

$\alpha_{\text{ТТ}}$ — коэффициент теплопередачи при фазовых переходах, происходящих внутри ТТ;

$\eta_{\text{ТТ}}$ — коэффициент, учитывающий несоответствие площадей теплообмена в ТТ и контакта, а также влияние неравномерности подвода-отвода теплоты по сечению ТТ;

$\alpha_{\text{конт}}$ — коэффициент теплопередачи в контактном теплообмене.

Условие (1) впервые было реализовано в конечно-элементном пакете HEAT-90 [1, 2].

Аналитические решения подобных задач, представляющих трехслойную композицию с неравномерными свойствами и граничными условиями, имеют ряд существенных ограничений [3—5] и поэтому малоэффективны для анализа данной конструкции. В связи с этим в нашем исследовании для количественной оценки поля температур использован численный метод, реализованный в конечно-разностном пакете TAS [6].

Тепловыделение транзистора задавалось как постоянное по объему транзистора. Отвод теплоты от поверхности блока моделировался контактными теплообменом с посадочным местом изделия (температура которого на расстоянии 0,5 м от блока принималась постоянной), а также конвекцией и излучением с поверхности блока. Теплоотвод внутри герметичного блока осуществлялся только теплопроводностью и контактными теплообменом.

Результаты моделирования показали, что улучшение контактного теплообмена между корпусом транзистора и платой усилительного модуля, а также между корпусом блока и посадочным местом изделия, имеет существенное значение. Увеличение коэффициента контактного теплообмена $\alpha_{\text{конт}}$ с 1000 до 10000 Вт/(м²·К) [7] позволяет уменьшить температуру транзистора на 110 К (при тепловой мощности 27 Вт). Использование ТТ дополнительно уменьшает температуру транзистора на 5—15 К за счет повышения изотермичности блока и увеличения поверхности теплообмена. Существенно важным фактором в этом случае является использование возможностей дополнительного теплообмена — конвективного и радиационного отвода теплоты от поверхности корпуса блока, позволяющего к концу двухчасового рабочего цикла блока уменьшить температуру транзистора дополнительно на 15—20 К (рис. 3).

Повышение изотермичности основания блока за счет встраивания в него трех плоских ТТ, как пока-

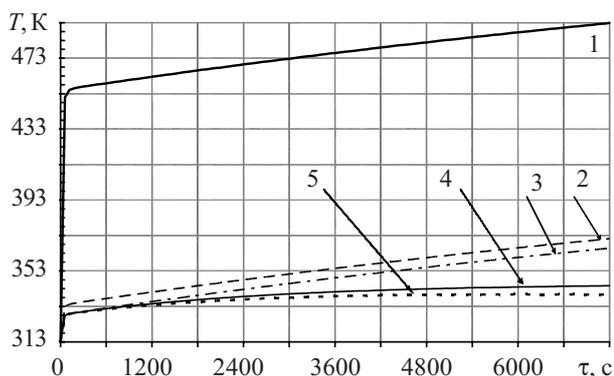


Рис. 3. Изменение температуры корпуса транзистора во времени (τ) при различных условиях охлаждения транзистора:

1 — $\alpha_{\text{конт}} = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; 2 — $10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
3 — $10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) + 1 \text{ ТТ}$;
4 — $10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) + 1 \text{ ТТ} + \text{улучшенный внешний теплообмен}$;
5 — $\alpha_{\text{конт}} = 10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) + 1 \text{ ТТ} + \text{улучшенный внешний теплообмен} + 3 \text{ ТТ в основании блока}$

зывают расчеты, позволяет дополнительно снизить температуру корпуса транзистора на 5 К.

Физическое моделирование тепловых режимов

Анализ возможности использования современных средств улучшения контакта — эластичных прокладок, материалов с изменением фазового состояния, теплопроводных паст и гелей с металлическими частицами [7] показывает, что при плотности теплового потока 10^5 Вт/м^2 (10 Вт/см^2) перепад температур ΔT_k в зоне контакта между поверхностью тепловыделяющего элемента и охлаждающей поверхностью достигает 20—100 К для сухих поверхностей и может быть уменьшен до 2—7 К при использовании гелей с металлическими частицами (рис. 4).

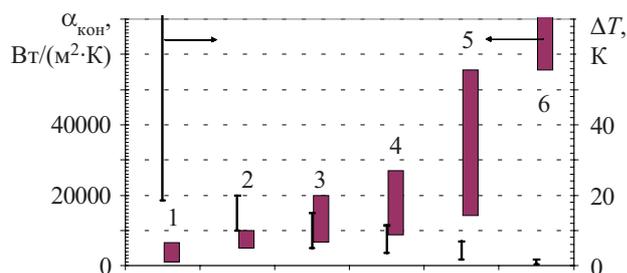


Рис. 4. Достижимые значения коэффициента контактного теплообмена для различных способов улучшения теплового контакта и ожидаемые перепады температур между соединяемыми поверхностями (плотность теплового потока 10^5 Вт/м^2):

- 1 — контакт поверхностей без наполнителей; 2 — эластичные прокладки; 3 — материалы с изменением фазового состояния; 4 — пасты; 5 — гели с металлическими частицами; 6 — эвтектическое соединение

Следует отметить, что такие способы соединения как склеивание поверхностей специальными компаундами или пайка позволяют увеличить коэффициент контактного теплообмена до 50000—200000 Вт/(м²·К) [8]. Однако в этом случае становится невозможной замена элемента. Кроме того, температурный режим и требования к типу материала поверхности существенно ограничивают применение этого типа соединений. (Вместе с тем если в результате исследований будет установлено, что неразъемное соединение пайкой даст существенный выигрыш в перепаде температур по сравнению с использованием других заполнителей и если оно в принципе допустимо в модернизируемом изделии, то его целесообразно будет использовать для снижения температуры транзистора.)

В рассматриваемом микроэлектронном блоке транзистор FLL 2001В-3 должен быть установлен с соблюдением условий минимального термического сопротивления, электропроводности и минимального газовыделения. С учетом [9, с. 819—829; 10] для дальнейших исследований были отобраны пасты Arctic Silver 5, КПТ-8, прокладки T-gon 805-A1 и др.

Для экспериментального исследования эффективности использования каждого из выбранных образцов в условиях прижима и неплоскостности, типичных для транзистора FLL 2001В-3, была создана экспериментальная установка, позволяющая моделировать реальные размеры контакта (2,1×1,1 см), основ-

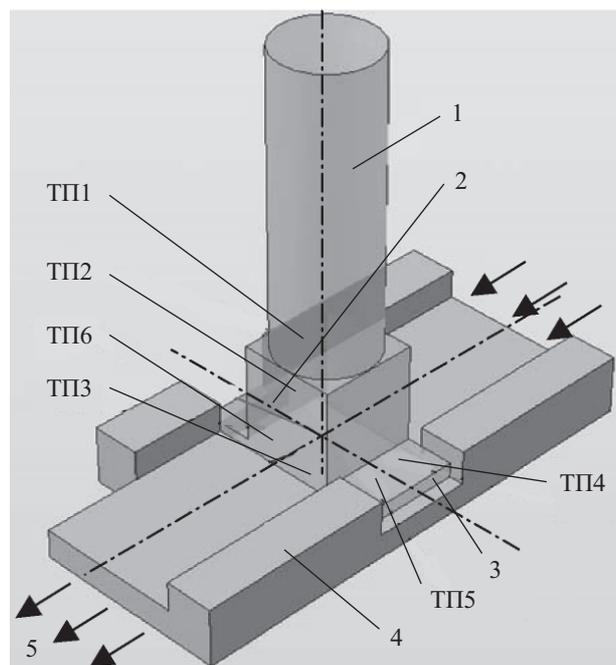


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1 — нагреватель (имитатор кристалла); 2 — имитатор термического сопротивления; 3 — крепежный фланец; 4 — имитатор посадочного места на плате усилительного модуля; 5 — охлаждающая среда; ТП — термопара

ные механические свойства контактирующих поверхностей и условия прижима. Схема рабочего участка экспериментальной установки представлена на рис. 5.

Тепловой поток от нагревателя через имитатор термического сопротивления транзистора, крепежный фланец и тепловой контакт передается к имитатору посадочного места на плате усилительного модуля, охлаждаемой потоком жидкости со стабилизированной температурой и расходом. Медь-константовая (диаметр провода 0,16 мм) термопара ТП1 измеряет температуру нагревателя, ТП2 — температуру на поверхности крепежного фланца транзистора, ТП3—ТП6 — температуру в четырех точках на поверхности имитатора посадочного места. Закрепление фланца к посадочному месту осуществляется двумя винтами М3 и тарированным моментом затяжки, равным 0,50 Н·м. Перед сборкой исследуемый тип материала-заполнителя помещается между фланцем транзистора и посадочным местом в соответствии с требованиями по его установке.

Эксперименты проведены при температуре охлаждающей жидкости 40°С (313 К). Результаты обработаны в виде зависимости перепада температур от мощности тепловыделения $\Delta T_k = f(Q)$ (рис. 6), которая дает представление о достигнутом уменьшении перепада температур между кристаллом транзистора и посадочным местом транзистора (ΔT_k , группа кривых I) и фланцем транзистора и посадочным местом транзистора ($\Delta T_{1к}$, группа кривых II) за счет уменьшения контактного сопротивления. Здесь

$$\Delta T_k = T(\text{ТП1}) - T_{\text{средн}}(\text{ТП3...ТП6}),$$

$$\Delta T_{1к} = T(\text{ТП2}) - T_{\text{средн}}(\text{ТП3...ТП6}).$$

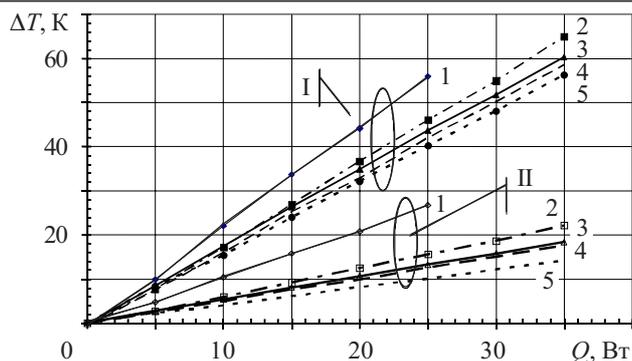


Рис. 6. Эффективность использования различных материалов для улучшения контакта транзистора и посадочного места:

1 — соединение «на сухую»; 2 — графитовая прокладка T-gon 805, толщина 0,25 мм; 3 — индиевая фольга 0,1 мм; 4 — паста КПТ-8; 5 — паста на основе серебра Arctic Silver 5

Экспериментальные данные по перепаду температур для наиболее эффективной пасты Arctic Silver 5 аппроксимируются зависимостями

$$\Delta T_{1к} = 0,4Q; \quad (2)$$

$$\Delta T_{к} = 1,61Q. \quad (3)$$

По зависимости (2) нетрудно определить, что в диапазоне мощностей тепловыделения транзистора от 27 до 51,5 Вт, характерном для модернизируемого изделия, перепад температуры в зоне контакта транзистора с шиной составляет от 11,0 до 20,8 К, соответственно. По зависимости (3) находим, что по сравнению с использованием «сухого» контакта, при максимально возможной мощности тепловыделения 51,5 Вт заполнение контактного зазора пастой Arctic Silver 5 позволяет снизить перепад температуры в зоне контакта фланца транзистора с посадочным местом на 34 К.

Увеличение момента затяжки с 0,50 до 1,0 Н·м при использовании этой пасты дает незначительное (на 0,5 К) понижение температуры транзистора, и поэтому увеличение момента затяжки винтом более 0,5 Н·м нецелесообразно.

На основании проведенных исследований с 10 видами материалов-заполнителей установлено, что для рассматриваемого случая наиболее эффективным решением является применение паст КПТ-8 и Arctic Silver 5.

Как показывают результаты исследований, фактическое уменьшение термического сопротивления "корпус транзистора—посадочное место транзистора" позволяет существенно понизить его перегрев относительно посадочного места. Однако понижение температуры посадочного места транзистора представляет не менее актуальную самостоятельную задачу. Одним из возможных путей решения этой задачи является использование тепловой трубы для отвода теплоты от транзистора или его посадочного места и перенос тепловой энергии к более холодным участкам корпуса блока, удаленно расположенным от посадочного места транзистора.

Для дополнительного отвода теплоты от транзистора разработано теплопередающее устройство на ос-

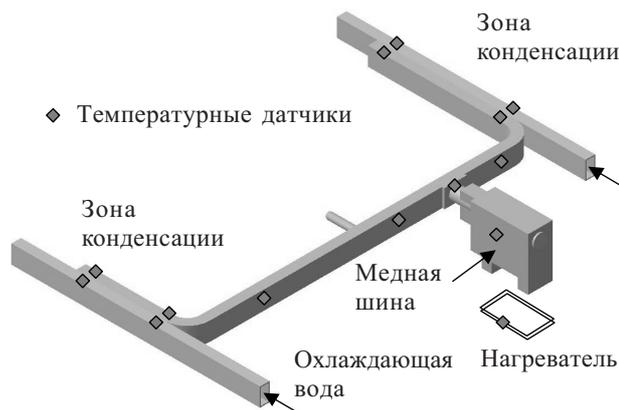


Рис. 7. Схема экспериментального участка для исследования тепловой трубы и теплопередающего устройства на ее основе

нове ТТ сложной формы (см. рис. 1, в). Корпус ТТ имеет прямоугольное сечение размером 8,3×4,5 мм и цилиндрическую часть диаметром 6 мм. Толщина стенки корпуса составляет 0,5 мм. Капиллярная структура ТТ — медный металлический войлок, изготовленный из волокон диаметром 50 мкм и длиной 3 мм. Толщина капиллярной структуры составляет 0,4 мм, пористость 86%. Теплоноситель — вода. Тепловая труба рассчитана на передачу теплового потока не менее 70 Вт в диапазоне температур 278—400 К при горизонтальной ориентации. Подсоединение ТТ к транзистору осуществляется с помощью медной шины, присоединенной к цилиндрической части ТТ.

Для экспериментального определения теплопередающих характеристик ТТ, теплопроводной шины и системы охлаждения в целом в зависимости от передаваемой тепловой мощности был создан экспериментальный участок (рис. 7). Термическое сопротивление тепловой трубы и всей тепловой цепи "нагреватель—сток" показано на рис. 8. Для ТТ определялась разность температур "зона испарения—зона конденсации ТТ", для системы охлаждения — "нагреватель—стенка водяного теплообменника". Присоединение шины к тепловой трубе и нагревателя к корпусу

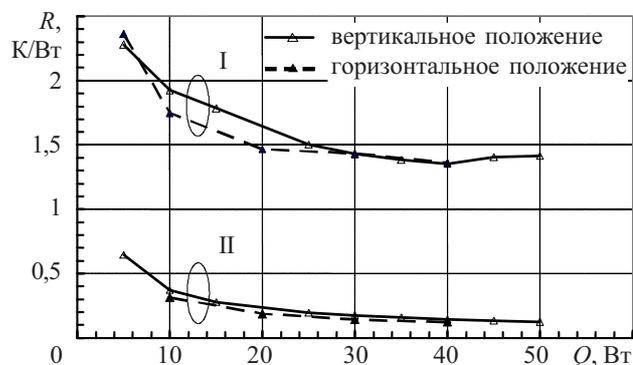


Рис. 8. Термическое сопротивление R системы «нагреватель—сток тепла» (группа кривых I) и термическое сопротивление тепловой трубы (группа кривых II) для горизонтальной и вертикальной ориентации плоскости изгиба ТТ (зона нагрева внизу)

су транзистора осуществлялось с помощью пасты Arctic Silver 5.

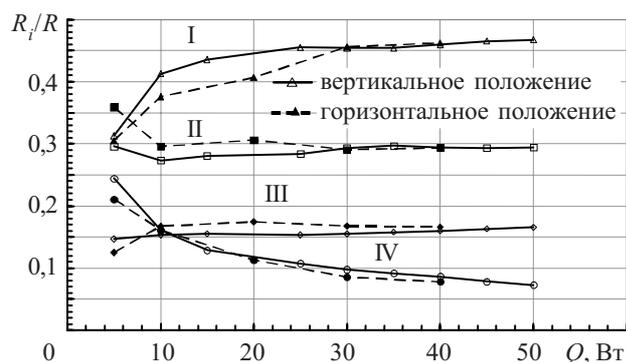


Рис. 9. Относительный вклад термических сопротивлений «нагреватель—шина» (кривые II), «шина—пар» (кривые I), «пар—стенка конденсатора» (кривые IV), «стенка конденсатора—охлаждающая среда» (кривые III) в общее термическое сопротивление «нагреватель—охлаждающая среда» для вертикальной и горизонтальной ориентации ТТ в исследованном диапазоне теплового потока

Вклад отдельных составляющих в суммарное значение перепада температуры в системе охлаждения показан на рис. 9.

Заключение

Анализ результатов экспериментального исследования свидетельствует о высокой эффективности предложенного решения: в диапазоне мощностей от 27 до 51,5 Вт (возможный диапазон увеличения мощности тепловыделения транзистора в модернизируемом изделии) термическое сопротивление ТТ изменяется от 0,2 до 0,1 К/Вт, что эквивалентно перепаду температуры по длине тепловой трубы от 5,4 до 5,15 К, соответственно.

Анализ показывает также, что основной вклад в суммарное значение перепада температуры в системе охлаждения (45%) вносит термическое сопротивление в зоне перехода «шина—пар», что обусловлено относительно высоким термическим сопротивлением в зоне контакта шины с тепловой трубой, заполненной пастой. Дальнейшие пути повышения эффективности охлаждения следует искать в уменьшении этого термического сопротивления, что может быть достигнуто, в частности, путем припаивания шины к цилиндрической части ТТ. Другим путем снижения этого сопротивления может быть оптимизация конструкции капиллярной структуры в зоне испарения ТТ для интенсификации теплопереноса при тепловых потоках до 20 Вт/см².

При условии пайки теплопроводным припоем контактных соединений в зонах «шина—ТТ» и «зона кон-

денсации ТТ—корпус блока» общий перепад температуры в системе «корпус транзистора—корпус блока» будет определяться перепадом температуры в зоне контакта «корпус транзистора—шина» и перепадом температуры по ТТ. Суммируя эти два перепада температуры, получим, что общее превышение температуры корпуса транзистора над температурой корпуса блока составит от 16,4 до 26,0 К соответственно для мощности тепловыделения от 27,0 до 51,5 Вт. Тогда при заданной температуре корпуса блока 40°С (313 К) температура корпуса транзистора будет лежать в диапазоне от 56,4 до 66,0°С (от 329 до 336 К), соответственно.

Таким образом, разработанная система теплоотвода модернизированного сверхвысокочастотного герметичного микросистемного блока на основе тепловой трубы сложной формы, а также интенсификация теплопередачи в зоне контакта «корпус транзистора—посадочное место изделия» путем использования теплопроводной пасты и соединения тепловой трубы с шиной и корпусом блока с помощью пайки теплопроводным припоем, позволяют обеспечить температуру корпуса транзистора на уровне от 56,4 до 66,0°С при мощности тепловыделения от 27,0 до 51,5 Вт и заданной температуре корпуса блока 40°С.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Батуркин В., Шкода К., Кришук Н., Байбузенко Г. Моделирование теплопереноса в зонах подвода и отвода тепла тепловых труб сложной формы методом конечных элементов // 2-й Междунар. форум по тепло- и массообмену.— Минск, Беларусь.— 1992.— Т. VII. Теплоперенос в капиллярных системах.— С. 101—103.
2. Baturkin V., Bondar L., Shcoda K. Thermal regimes simulation of ramified heat pipes communication by finite element method // 25 ICES SAE-95.— Sun-Diego, USA.— 1995.— Report N 951553.
3. Дульнев Г. Н., Семьяшкин Э. М. Теплообмен в радиолетронных аппаратах.— Л.: Энергия, 1968.
4. Bobco R. P., Starkovs R. P. Rectangular thermal doublers of uniform thickness // AIAA Journal.— 1985.— Vol. 23 (12).— P. 1970—1977.
5. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры.— М.: Сов. радио, 1976.
6. www.HarvardThermal.com
7. Guenim W. B. Cooling solution in the past decade // Journal ElectronicsCooling.— 2006.— Vol. 11, N 4.— P. 6—20.
8. Blazej D. Thermal interface materials. www.electroniccooling\2003_November_a1.htm
9. Spacecraft thermal control handbook. Vol. 1. / Editor D. Gilmore.— El Segundo, California; Reston, Virginia: The Aerospace Press, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2002.
10. 2006 Buyer's guide // Journal ElectronicsCooling.— 2006.— Vol. 11, N 4.— P. 41—59.

К. т. н. Е. Б. МЕХАНЦЕВ, к. т. н. Е. Т. ЗАМКОВ, А. В. ПАЛИЙ

Россия, Таганрогский государственный радиотехнический университет
E-mail: kes@fep.tsure.ru

Дата поступления в редакцию
15.11 2006 г. — 01.02 2007 г.

Оппонент к. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ
(НТУУ "КПИ", г. Киев)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ПАРАМАГНИТНОГО ВЕЩЕСТВА В КОНДЕНСАТОРЕ ТЕПЛОЙ ТРУБЫ

Приведена мотивация возможности использования парамагнетиков в сильном магнитном поле в криогенных тепловых трубах.

Отвод тепла от греющихся в процессе работы различных элементов и устройств в целом имеет своей целью повышение их надежности. Эффективной системой теплоотвода является тепловая труба (ТТ).

Конструктивно классическая тепловая труба состоит из зон испарения, паропровода и конденсации. Общий принцип действия подобных ТТ состоит в следующем. Внутрь корпуса вводят небольшое количество жидкости, откачивают воздух и герметизируют (запаивают) корпус. При подводе тепла к зоне испарения жидкость переходит в пар, пар движется по паропроводу, конденсируется в зоне конденсации, конденсат стекает по стенкам вниз, обратно в зону испарения.

Необходимым условием работы является отвод тепла из зоны конденсации, при этом эффективность теплоотвода ТТ в значительной степени определяется эффективностью работы ее конденсатора. Конденсатор будет тем эффективнее, чем быстрее он будет передавать тепло в окружающее пространство (внешний приемник тепла).

Кроме известных конструкций конденсаторов [1, 2], в работе [3] рассматривалась возможность выполнения конденсатора тепловой трубы на основе лазерного рефрижератора с газодинамической накачкой. В данной работе для охлаждения рабочего вещества в конденсаторе предлагается использовать способность парамагнетиков охлаждаться в сильном магнитном поле. Это свойство целесообразно использовать в криогенных тепловых трубах.

Известно, что процесс адиабатического размагничивания парамагнитного вещества приводит к понижению его температуры [4, с. 12].

Количественная оценка процесса намагничивания парамагнетиков характеризуется пропорциональной связью между степенью намагниченности материала (значение магнитного момента) и напряженностью магнитного поля:

$$M = \frac{N\mu^2 B}{3kT},$$

где M — магнитный момент;

N — число атомов в единице объема;

μ — постоянная намагничивания;

B — напряженность магнитного поля;

k — постоянная Больцмана;

T — температура.

Эта приближенная формула верна тогда, когда отношение $\mu B/kT$ много меньше единицы. Эффект парамагнетизма сильнее проявляется в веществах при понижении температуры и слабее — при ее повышении.

Чем сильнее становится поле, тем быстрее магнитный момент приближается к своему предельному значению, когда наступает предел намагничивания, насыщение (магнитные диполи выстраиваются в одном направлении). До наступления насыщения магнитные диполи стремятся выстроиться в направлении действия магнитного поля, а действие температуры (kT) приводит к уменьшению этого эффекта. При этом будет происходить понижение температуры, т. к. тепловая энергия тратится на изменение направления доменов, а магнитное поле стремится вернуть их в исходное состояние.

Если взять в качестве парамагнетика соль, содержащую некоторое количество примеси редкоземельных атомов (например, аммиачный нитрат празеодима), и охлаждать ее жидким гелием до 1—2 К в сильном магнитном поле, то большинство спинов приобретет одинаковую направленность, и намагниченность достигнет насыщения. Если в этот момент обеспечить тепловую изоляцию соли (удалив жидкий гелий и создав вакуум) и выключить магнитное поле, то температура соли уменьшится из-за затрат тепловой энергии на разворот диполей.

При внезапном отключении поля тепловая энергия приведет к хаотическому распределению направлений диполей. Но случайное распределение направлений диполей установится без какого-либо изменения температуры. Если же магнитное поле ослаблять постепенно, то изменения направлений диполей произойдут с затратой некоторой энергии, т. е. будет совершаться работа против действия поля. Этот процесс приводит к уменьшению температуры соли, т. к. происходит с поглощением тепловой энергии: размагничиваясь, соль охлаждается.

Механизм охлаждения вещества при его размагничивании можно представить и с точки зрения кван-

товой механики. Когда напряженность поля достаточно сильна, все атомы находятся в наименьшем энергетическом состоянии. Но как только напряженность поля понижается, тепловые флуктуации со все большей и большей вероятностью будут «выталкивать» атомы на более высокие энергетические уровни, при этом каждый атом поглощает энергию $\Delta U = \mu_0 B$. Если магнитное поле выключается медленно, магнитные переходы могут отбирать энергию тепловых колебаний кристалла, тем самым охлаждая его.

Таким способом можно понизить температуру от нескольких градусов до тысячных долей градуса. Возможно и дальнейшее охлаждение вещества — за счет ядерного парамагнетизма, т. к. и у ядер есть магнитные моменты, только они приблизительно в тысячу раз меньше. Точнее, они меньше в число раз, равное отношению масс протона и электрона. А для таких магнитных моментов даже при температуре 2 К показатель $\mu B/kT$ составляет всего несколько тысячных. Но если мы используем парамагнитное размагничивание и достигнем температуры в несколько тысячных долей градуса, то $\mu B/kT$ становится порядка единицы; при столь низких температурах мы уже можем говорить о насыщении ядерного магнетизма. И теперь, воспользовавшись адиабатическим размаг-

ничиванием системы магнитных ядер, можно достичь еще более низких температур.

Таким образом, в магнитном охлаждении возможны две стадии. Сначала предварительно охлажденный в жидком гелии парамагнитный материал подвергается диамагнитному размагничиванию, и температура снижается до нескольких тысячных долей градуса, затем материал помещается в холодную парамагнитную соль.

Когда магнитное поле выключается, температура материала доходит до миллионных долей градуса.

Таким образом, для криогенных тепловых труб при необходимости может быть обеспечен определенный диапазон регулирования температуры в конденсаторе.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Елисеев В. Б., Сергеев Д. И. Что такое тепловая труба?— М.: Энергия, 1971.
2. Вааз С. Л. Тепловые трубы и их применение.— М.: ЦНИИ «Электроника», 1974.
3. Механцев Е. Б., Замков Е. Т., Палий А. В. Конденсатор тепловой трубы на основе лазерного рефрижератора // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2006.— № 3.— С. 48—49.
4. Гребер Г., Эрк С. Охлаждение адиабатическим размагничиванием.— М.: Изд-во иностр. лит., 1978.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Тимофеев В. Н., Позалов А. И., Угольников С. В., Андрианов А. М., Панкратов О. В. Техническая механика микросистем: Уч. пособие / Под ред. В. Н. Тимофеева.— М.: МИЭТ, 2006.— 188 с.

Пособие посвящено механике микросистем, являющейся составной частью физики микросистем. Изложены основы теории механических колебаний, анализа напряженно-деформированного состояния несущих элементов, демпфирования, электромеханики. Рассмотрены современные конструкции микрогирископов, акселерометров, микрзеркала, что обусловлено большим практическим интересом к таким приборам.

Предназначено для студентов старших курсов, обучающихся по направлениям (специальностям) «Микросистемная техника» и «Микроэлектроника и твердотельная электроника». Может быть полезно аспирантам и инженерам, занимающимся исследованием и разработкой микросистемной техники.

НОВЫЕ КНИГИ



Гамбург Ю. Д. Гальванические покрытия. Справочник по применению.— М.: Техносфера, 2006.— 216 с.

Справочник содержит данные по современной гальванотехнике и свойствам гальванопокрытий для разных областей применения. Детально разобраны преимущества и недостатки каждого вида покрытий, их функциональные характеристики, рецептура растворов, методы их приготовления, принципы выбора оптимальных процессов, режимы работы и особенности эксплуатации гальванических ванн.

Приведены исчерпывающие сведения об электрохимии анодных и катодных реакций. Даны подробные сведения о роли компонентов, примесей и добавок, методы контроля физических свойств и структуры гальванопокрытий.

Справочник предназначен для учащихся и технологов в отраслях машиностроения, приборостроения и электроники.

К. т. н. Т. В. ШЕСТАКОВА

Молдова, г. Кишинев, Технический университет
E-mail: t.sestacova@mail.ru

Дата поступления в редакцию
24.07—14.12 2006 г.

Оппонент к. ф.-м. н. А. Н. ПЕТЛИЦКИЙ
(НПО "Интеграл", г. Минск)

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАДИЙ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

Рассматривается методика исследования технологического процесса изготовления интегральных микросхем в условиях реального производства с целью повышения качества готовой продукции.

Технологический процесс (ТП) изготовления интегральных микросхем (ИМС) является многофакторным объектом со сложной структурой внутренних взаимосвязей. Рост степени интеграции компонентов и их функциональной сложности обуславливает появление новых острых проблем в области повышения качества и надежности изделий микроэлектроники. Так, значительное увеличение выпуска ИМС тормозится сравнительно низким процентом выхода годных. Причиной этого является несовершенство как самой технологии изготовления микросхем, так и методов и средств контроля и управления.

В статье рассматривается методика исследования ТП производства кристаллов ИМС с целью повышения качества изделий электронной техники непосредственно в процессе их производства.

Методы исследований

В силу стохастичности ТП и вероятностного характера контролируемых величин в условиях *массового производства* ИМС наиболее перспективным для решения указанных задач является математико-статистическое направление причинно-следственного подхода. Объект при этом рассматривается как некоторая система взаимодействия входных параметров с некоторой выходной целевой функцией, причем структура и степень взаимосвязи параметров в общем случае неизвестны (модель «черного ящика»). Результатом реализации этого подхода является получение на основе экспериментальных данных математических моделей процессов в виде регрессионных уравнений, описывающих механизм взаимодействия входных и выходных параметров. Получаемые математические модели используются как для диагностики состояния объектов, так и для прогнозирования их поведения, выявления тенденций и скорости изменения и развития.

В электронной промышленности накоплен определенный опыт использования этого подхода, однако моделирование в условиях *непрерывного производственного цикла*, которое учитывало бы специфику

сбора данных, а также структурные особенности и сложность исследуемых объектов, представляет собой серьезную проблему.

Как известно, эксперимент может быть специально спланирован (его тогда называют *активным*), а может быть лишь измерением значений факторов при различных состояниях объекта (*пассивный эксперимент*). В последнем случае получение информации не требует больших затрат на проведение опытов, т. к. осуществляется в непрерывном производственном цикле, хотя и занимает больше времени.

Одним из самых распространенных и давно известных методов расчета регрессионных моделей в условиях пассивного эксперимента является *классический метод наименьших квадратов (МНКК)* [1, с. 141]. Однако он обладает рядом недостатков. Как известно, свойства информации, полученной при реализации пассивного эксперимента, отличаются от свойств информации активного плана, что в конечном итоге сказывается на точности и эффективности рассчитанной математической модели. Так, нарушение свойств ортогональности, линейной независимости, нормировки столбцов исходной таблицы данных приводит к тому, что коэффициенты будущей модели являются смешанными оценками, и любое изменение формы уравнения требует пересчета всех коэффициентов заново. Кроме того, невозможна процедура статистической проверки адекватности таких моделей (например, по критерию Фишера), нет информации о степени влияния каждого фактора на целевую функцию, имеются определенные неудобства вычислительной процедуры при возрастании числа исследуемых факторов. Все это снижает точность расчетов и оперативность обработки информации и ограничивает, таким образом, возможность применения метода непосредственно в производственных условиях.

Проблему получения адекватных математических моделей с выявлением степени влияния на целевую функцию каждого рассматриваемого фактора в отдельности предлагается решать с помощью специального метода — *метода наименьших квадратов с ортогонализацией исходных данных (МНКО)* [2, 3]. В отличие от классического, метод МНКО предусматривает процедуру предварительной ортогонализации исходных данных, что позволяет получить независимые оценки коэффициентов регрессии со всеми

необходимыми процедурами статистического анализа (проверка на значимость, однородность, адекватность). Это обстоятельство и обеспечивает высокую точность, разрешающую способность и эффективность метода в условиях реального производства массовой продукции.

Результаты исследований

Исследования проводились в несколько этапов. Охватить весь технологический процесс изготовления ИМС в целом — практически невыполнимая задача. Поэтому на первом этапе мы ограничились лишь частью сложной производственной цепи, на выходе которой наблюдался самый большой процент брака, а именно, ТП формирования структуры ИМС на уровне кристаллов. Этот процесс состоит из множества операций, на которых действуют десятки факторов различной физической природы и различного характера проявления (вероятностные, случайные, детерминированные и т. д.) со сложной многоуровневой структурой взаимосвязей.

В качестве целевой функции можно выбирать различные параметры ТП в зависимости от цели и уровня исследований. Главное, чтобы параметр являлся комплексным выходным показателем качества (ВПК) на данном уровне. Например, это может быть процент выхода годных всего ТП или отдельных его операций. В рассматриваемом исследовании в качестве ВПК было выбрано *выходное напряжение логического "нуля"*, являющееся комплексной оценкой как самого ТП, так и его продукции. Кроме того, именно по этому параметру имелся наибольший процент брака на выходе.

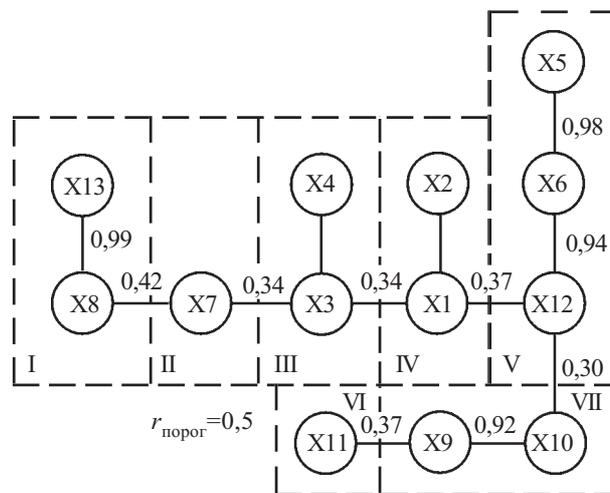
Главная сложность в исследовании подобных процессов состоит в так называемом «проклятии размерности пространства». Дело в том, что на сегодняшний день не существует эффективных методов получения математических моделей объектов, в которых действуют десятки, а то и сотни входных факторов. А процесс производства ИМС, как отмечалось выше, именно таковым и является. Поэтому необходимым следующим этапом было сокращение исходного списка входных факторов с оставлением в нем лишь сильнодействующих.

С этой целью, исходя из процесса формирования основных технических свойств изделий, а также технологических этапов изготовления пассивных и активных элементов на кристалле, была построена структурная схема формирования ВПК. На нижнем уровне иерархической схемы располагались технологические факторы процесса (температура, расход газов, длительность процессов и т. д.), на следующем уровне — электрофизические параметры (ЭФП) структуры микросхем (поверхностное сопротивление слоев, их физические размеры и пр.), затем следовали ЭФП компонентов ИМС (коэффициенты усиления, входное и выходное напряжение диодов Шоттки, сопротивление тела коллектора и др.). На самом верхнем уровне иерархии находились статические параметры — выходное напряжение логического "нуля" и логической "единицы", выбранные в качестве ВПК кристаллов ИМС. При этом учитывалась возмож-

ность измерения и контроля рассматриваемых факторов и параметров в реальном производстве.

Построение структурной схемы значительно уменьшило неопределенность в идентификации взаимосвязей параметров, однако эти связи могут быть еще достаточно сложными (пересекающимися, обратными и т. д.), что затрудняет дальнейшее моделирование. В этом случае целесообразно воспользоваться подходом, связанным с агрегированием параметров, т. е. выделением группы факторов в виде одного обобщенного фактора. Реализует этот подход так называемый метод *корреляционных плеяд* [4, с. 96], основанный на предположении, что измеряемые параметры наиболее сильно коррелируют друг с другом в том случае, когда они сильно зависят от одного и того же фактора.

Это предположение принимается за исходную гипотезу, и производится разбиение всех измеряемых параметров на такие группы-плеяды, что параметры, принадлежащие одной группе, в некотором смысле сильно коррелируют между собой, а параметры, принадлежащие разным группам, коррелируют относительно слабо. При этом матрица корреляций преобразуется в некоторый граф с учетом возрастания коэффициентов корреляции между параметрами. Фрагмент такого графа представлен на **рисунке**. Всего было рассмотрено 58 параметров, из которых после разбиения получилось 12 плеяд.



Фрагмент графа корреляционных плеяд (7 плеяд)

При выборе порогового значения коэффициента корреляции $r_{\text{порог}}$ при разбиении необходимо учитывать как статистический, так и физический смысл исследуемой взаимосвязи. Отбрав от каждой плеяды по одному представителю (возможно, где-то по два), получаем список информативных параметров, которые в дальнейшем войдут в математическую модель. На этом этап сокращения факторного пространства завершен.

Следующим этапом исследования является определение математической модели зависимости ВПК от параметров, выявленных на предыдущем этапе.

Методом МНК были получены модели, одна из которых имеет следующий вид:

$$U_{\text{вых}}(0) = 419,7 + 5,365X_{11} + 1,970X_5 + 1,394X_1 - 0,55X_7 + 0,020X_4,$$

где $U_{\text{вых}}(0)$ — выходное напряжение логического "нуля";
 X_1 — поверхностное сопротивление скрытого слоя;
 X_4 — статический коэффициент усиления транзистора;
 X_5 — поверхностное сопротивление эмиттера;
 X_7 — выходное напряжение диода Шоттки на кристалле;
 X_{11} — сопротивление на кристалле.

При этом были соблюдены все формальные процедуры статистического анализа, в том числе проверка на значимость коэффициентов модели и ее адекватности. В модель вошли лишь сильнодействующие факторы, выявленные по критерию Стьюдента [5, с. 331]. Но это не означает, что остальные факторы, не вошедшие в модель, не влияют на целевую функцию. Просто их влияние гораздо слабее на фоне оставшихся факторов, поэтому с риском 1—5% ими можно пренебречь.

По полученной модели можно прогнозировать поведение $U_{\text{вых}}(0)$ в зависимости от изменения значений входных факторов путем подстановки в уравнение конкретных значений X_i . Причем достоинством уравнений данного типа является то, что значения факторов подставляются в натуральных единицах измерения, без каких-либо преобразований, что очень удобно в условиях реального производства. Кроме того, с помощью уравнения решается и обратная задача — определение величин факторов X_i для получения требуемого значения целевой функции.

Представленная выше модель описывает взаимосвязь параметров верхних уровней иерархии. Вошедшие в нее параметры, в свою очередь, формируются составляющими нижнего уровня, т. е. факторами технологических режимов. Для этих параметров также были рассчитаны математические модели, описывающие влияние разброса технологических режимов различных операций на параметры микросхем на кристалле. По модели путем корректировки параметров режимов (в пределах допустимых значений) можно скорректировать качество готовой продукции, т. е. увеличить количество микросхем с требуемыми характеристиками.

Аналогичные исследования следует проводить на различных уровнях формирования выходного показателя качества (согласно структурной схеме). При этом на одном уровне иерархии параметр может выступать в качестве целевой функции, а на другом — в качестве входного фактора. Таким образом, можно скорректировать все «узкие места» сложного многофакторного процесса.

Заключение

Приведенные методы и результаты исследований показывают, насколько эффективно можно применять современные методы научных исследований в условиях сложных многофакторных процессов, каким является технологический процесс изготовления интегральных микросхем. В настоящее время такой подход, на наш взгляд, является единственным эффективным средством изучения одновременного влияния множества факторов, как сильно, так и слабо действующих на выходной показатель качества продукции. По полученным математическим моделям можно сделать выводы относительно причин появления изделий низкого качества, давать рекомендации по оптимизации технологических режимов конкретных операций непосредственно в производственных условиях. Внедрение полученных результатов позволяет увеличить выход годных изделий.

Следует также отметить, что математические модели данного типа справедливы лишь для тех процессов, в условиях которых ставились эксперименты по их определению. Поэтому в случае каких-либо изменений в конструкции изделий или технологии их изготовления математические модели следует корректировать, проводить дополнительные эксперименты и заново рассчитывать коэффициенты моделей.

Данная методика исследований реализована в виде пакета прикладных программ, позволяющих оперативно, в условиях реального производства производить необходимые расчеты по результатам контрольных измерений в ходе технологического процесса.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий.— М.: Наука, 1976.
2. Долгов Ю. А., Шестакова Т. В. Метод моделирования технологических процессов серийного производства // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— № 4'1992/1'1993.— С. 23—25.
3. Shestakova T. Mathematical modeling in integrated circuit technologies // Intern. Conf. on Automation, Quality and Testing, Robotics A&QT-R 2002 (THETA).— Cluj-Napoca, Romania.— 2002.— Т. I.— Р. 274.
4. Дружинин Г. В. Методы оценки и прогнозирования качества.— М.: Радио и связь, 1982.
5. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений.— М.: Наука, 1971.

К. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА, д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ,
Ф. А. ГИЯСОВА, Р. А. САИДОВА

Узбекистан, г. Ташкент, НПО «Физика–Солнце»
E-mail: karimov@uzsci.net

Дата поступления в редакцию
30.11 2006 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Н. Н. ГРИГОРЬЕВ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ ВЫРАЩИВАНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ A^3B^5

Предлагаемые способ и устройство предназначены для создания многослойных полупроводниковых приборов различного спектрального диапазона, а также структур на основе арсенидгаллиевых соединений.

Известно, что на сегодняшний день тонкие эпитаксиальные гомо- и гетерослои широко используются при создании эффективных фотопреобразователей, излучателей и фотоприемников различного спектрального диапазона, а также для получения биполярных и полевых транзисторных структур на основе полупроводниковых соединений A^3B^5 . В связи с этим актуальной задачей является совершенствование способов получения тонких и многослойных эпитаксиальных гомо- и гетероструктур.

Необходимость создания сложных многослойных полупроводниковых приборов требует разработки новых методов получения полупроводниковых слоев и структур, особенно на гетеропереходах. Анализ современного состояния технологии получения полупроводниковых слоев показывает, что к настоящему времени для получения монокристаллических слоев и $p-n$ -переходов в полупроводниковых структурах в основном используются три метода эпитаксиального наращивания — вакуумное испарение и конденсация, газотранспортные химические реакции, жидкостная эпитаксия [1, с. 105—121]. Однако ни один из перечисленных методов еще не выделился в качестве доминирующего. Вместе с тем для получения сильнолегированных слоев полупроводниковых соединений A^3B^5 жидкостная эпитаксия является почти незаменимой. Кроме того, методом жидкостной эпитаксии можно получить резкие $p-n$ -переходы [2; 3, с. 41—61]. В частности, в методе жидкостной эпитаксии могут независимо задаваться изменение ширины запрещенной зоны, в заметной степени характеризующее оптические свойства материала, и внедрение примесей, определяющих его электрические свойства. Более того, состав полупроводника в процессе роста можно непрерывно менять, например от арсенида галлия до арсенида галлия–алюминия и т. д., и при этом ширина запрещенной зоны может быть управляемо изменена в пределах любого заранее заданного расстояния.

Так как метод жидкостной эпитаксии довольно скоростной и прост в работе, то его усовершенствование для целей получения различных полупроводниковых структур заслуживает внимания [4]. Известно, что в жидкостной эпитаксии принципы охлаждения и подачи раствора-расплава фактически являются определяющим фактором конкретного метода. Так, при смешивании двух растворов-расплавов при фиксированной температуре имеем изотермическую жидкостную эпитаксию, а при выращивании из тонкого зазора, куда раствор-расплав втягивается за счет смачивания, имеем капиллярную жидкостную эпитаксию [5, с. 18—30]. В зависимости от требуемых параметров получаемой структуры могут использоваться одновременно несколько методов роста, тогда возникает необходимость совмещения этих методов в едином процессе, что может быть реализовано в специальных комбинированных устройствах, обладающих широкими возможностями управления параметрами выращиваемых слоев [6—8].

В настоящей работе описаны процессы роста эпитаксиальных слоев полупроводниковых соединений A^3B^5 комбинированным способом с помощью универсального устройства. Устройство с ячейками для трех растворов-расплавов (рис. 1) позволяет реализовать в едином процессе два отличающихся способа роста. Один способ (принудительное охлаждение) позволяет управлять толщиной выращиваемых слоев, а другой (изотермический) — задаваемым составом получаемых пленок.

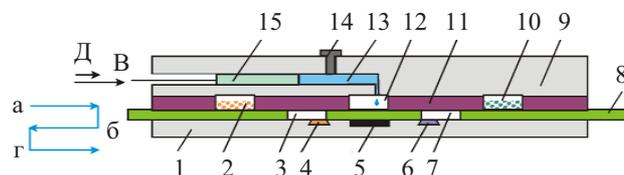


Рис. 1. Разрез рабочей части универсального (сдвигового + поршневого) устройства жидкостной эпитаксии

Устройство состоит из неподвижного основания 1 с углублениями, где расположены источники 4, 6 для среза раствора и с ячейкой 5 для подложки. Для подачи растворов служит подвижная (позиции а, б, в) пластина 8 с отверстиями 3, 7. В дополнительной пластине 11 расположены бункеры 2, 10 и отверстие 12 для подачи раствора-расплава, выдавливаемого поршнем 15 (позиции В, Д) из емкости 13 с капил-

лярным отверстием и пробкой 14 в верхней части контейнера 9.

Для проведения процесса эпитаксии подготовленное устройство с подложкой n^+GaAs 5 и расплавами $Ga+nGaAs$ ($5,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) 10 и $Ga+nGaAs$ ($7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) 2 помещали в кварцевый реактор, продуваемый потоком очищенного водорода. Затем всю систему нагревали до необходимой температуры (например до 808°C) и выдерживали в течение 10—15 мин. Далее при перемещении пластины 8 вправо расплав 10 из бункера сливался в отверстие, которое в дальнейшем совмещали с поверхностью подложки. Затем включали программное охлаждение, при этом выращивали слои за счет принудительного охлаждения до 805°C . При этой же температуре приостанавливали охлаждение системы и в раствор-расплав с определенной скоростью порциями через капиллярное отверстие вливали раствор-расплав $Ga+Al$ 13, содержащий замещающий элемент (в данном случае Al). При этом осуществлялся изотермический способ выращивания эпитаксиального слоя $n-AlGaAs$ с увеличивающейся шириной запрещенной зоны, определяемой различием количества замещающих элементов.

Особенность предлагаемого устройства заключается в том, что поочередно выращиваемые многослойные эпитаксиальные пленки на подложке n^+GaAs получают комбинированным способом: принудительным охлаждением создаются первый слой $nGaAs$ ($5,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) и второй — $nGaAs$ ($7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), затем изотермической эпитаксией формируется третий гетерослой $nAl_xGa_{1-x}As$ ($5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Для этого подобран специальный программируемый режим, приведенный на рис. 2, где горизонтальный участок кривой (в) соответствует изотермической жидкостной эпитаксии, а спадающие (а, б) — выращиванию слоя принудительным охлаждением.

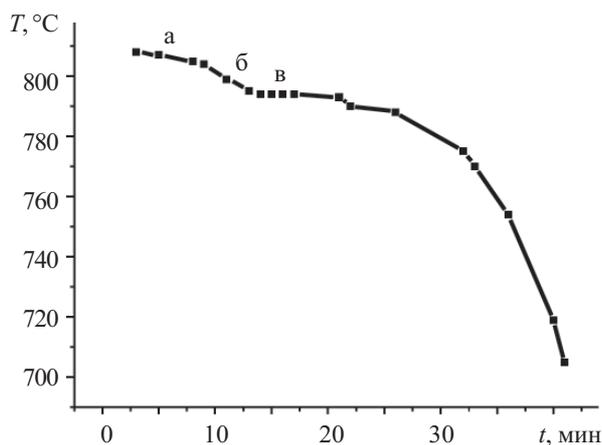


Рис. 2. Температурный режим процесса эпитаксии

При принудительном охлаждении после достижения начальной температуры кристаллизации (например 808°C) раствор-расплав приводится в контакт с подложкой и включается охлаждение, обеспечивающее снижение температуры по заданной кривой (участок а на рис. 2). В соответствии с данной кривой на начальном линейном участке снижение температуры идет с постоянной скоростью 1—2 $^\circ\text{C}/\text{мин}$. Далее, с целью ослабления диффузии примесей из твердой

фазы в выращиваемый эпитаксиальный слой, система, начиная с 805°C , охлаждается с переменной скоростью в соответствии с уравнением

$$V_{\text{п}} = 3,3 - (3 \dots 7) \cdot 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин},$$

что обеспечивает уменьшающуюся во времени скорость охлаждения на участке б от 805 до 796°C в течение 6—7 минут периода процесса выращивания.

При принудительном охлаждении толщина выращенного слоя определяется скоростью роста независимо от объема раствора-расплава. Например, на первом участке кривой охлаждения скорость роста равна 1,0 мкм/мин. При этом можно выращивать эпитаксиальные слои попеременно из имеющихся трех растворов-расплавов с соответствующими типами проводимости или составом.

Процесс изотермической жидкостной эпитаксии осуществляется путем смешивания растворов-расплавов с отличающимся составом — раствора-расплава, расположенного в верхнем поршне, с раствором-расплавом, совмещенным с подложкой. Процесс происходит при постоянной температуре, например 794°C , как показано на рис. 2, участок в. В данном случае раствор-расплав из поршня подается порциями, определяемыми временем выравнивания концентраций t_c и интервалом времени t между подачами. При интервалах времени между подаваемыми порциями $t < t_c$ растут слои с увеличивающейся к поверхности шириной запрещенной зоны, а при $t > t_c$ получается периодическая структура.

Исследования показали, что при $t = t_c/2$ можно получить эпитаксиальные слои $Al_xGa_{1-x}As$ с линейно увеличивающейся шириной запрещенной зоны. На основе измерений на косом шлифе на установке “Самеса” получены данные по распределению Al по толщине слоев. В пересчете на ширину запрещенной зоны по формуле [9, с. 18—21]

$$E_g(Al_xGa_{1-x}As) = 1,424 + 1,247x$$

эти данные сведены в таблицу.

Состав выращенного эпитаксиального гетерослоя $Al_xGa_{1-x}As$ по толщине

Толщина эпитаксиального слоя, мкм	0	1	2	3	4	5	6
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,424	1,474	1,524	1,574	1,624	1,674	1,723
Содержание Al, x	0,0	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24
Содержание Ga, 1-x	1,0	0,96	0,92	0,88	0,84	0,8	0,76

Границы толщины слоев взяты из данных микроанализа. В таблице содержание Al и Ga приведено в атомных долях, что соответствует определенному на основе микроанализа процентному соотношению между ними. Для этого основной раствор-расплав выбирается из соотношения $Ga/GaAs = 16,6$, а дополнительный $(Ga+Al)-(Ga/Al) = 57$. При этом толщина выращенного слоя зависела от температуры процесса и количества добавляемого раствора-расплава, а

также от времени подачи порций растворов-расплавов. Толщину выращиваемых слоев можно было варьировать от 0,2 до 2 мкм.

Профиль ширины запрещенной зоны зависит от скорости подачи порций (V) дополнительного раствора-расплава, определяемой выражением для получения линейного изменения состава:

$$V = m[t^0 - (t-1)^0].$$

Массу дискретной порции m дополнительного раствора выбирали из условия $m \approx 5 \cdot 10^{-2}$ массы основного раствора-расплава. Для случая $t_c = 2$ мин, $t = 1$ мин, $m = 40$ мг скорости подачи порций расплавов соответственно равнялись

$$V_1 = mt_1^0 = 40 \cdot 1 = 40 \text{ мг} \cdot \text{мин};$$

$$V_2 = mt_2^0 = 40 \cdot 1 = 40 \text{ мг} \cdot \text{мин};$$

$$V_3 = mt_3^0 = 40 \cdot 1 = 40 \text{ мг} \cdot \text{мин}.$$

Таким образом, с помощью данного устройства можно выращивать в едином процессе эпитаксиальные слои полупроводниковых соединений A^3B^5 как методом изотермической эпитаксии — смешиванием (при постоянной температуре) двух растворов-расплавов, так и принудительным охлаждением — из каждого раствора-расплава. При этом можно чередовать как последовательность выращиваемых слоев, так и их тип проводимости, а также задавать количество выращиваемых слоев, причем растворы-расплавы могут содержать не только Al, но и In, P или Sb, а также другие примеси — такие как Si, Ge, Sn.

Введение в раствор-расплав с определенной скоростью дополнительных растворов с известной концентрацией элемента-источника и растворителя позволяет на порядок повысить точность управления составом выращиваемого твердого раствора по сравнению с методом последовательной замены раствора-расплава с увеличивающимся компонентом. Выбранная скорость и метод подачи раствора обеспечивают более плавное (непрерывное) изменение состава за счет сохранения при этом почти неизменной степени пересыщения раствора-расплава. В данном случае исключается скачок состава, имеющий место при выращивании слоя из нескольких растворов-рас-

плавов с увеличивающейся с каждым разом концентрацией ростовых компонентов.

Концентрация носителей задается подбором исходного источника с соответствующей концентрацией, т. к. концентрация носителей в эпитаксиальных слоях получается близкой к концентрации растворяемого в галлии материала-источника.

На основе разработанной технологии получены структуры с барьером Шоттки Au- n AlGaAs- n GaAs- n^+ GaAs, Ag- n GaAs- n^+ GaAs [10], а также фотодиоды на основе Au- n AlGaAs- p GaAs-Ag-структуры [11, с. 133—139], перспективные для волоконно-оптических систем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия.— М: Мир, 1991.
2. Андреев В. М., Долгинов Л. М., Третьяков Д. Н. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов.— М.: Сов. радио, 1975.
3. Karimov A. V., Yodgorova D. M., Akopyan A. A. et al. Photoconverters with AlGaAs-GaAs heterojunction on textured GaAs substrates.— Tashkent: Fan, 2004.
4. Karimov A. V., Yodgorova D. M. Features of growth epitaxial layers of firm solutions on a basis of indium's and aluminium's arsenide // Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics.— 2004.— N 4.— P. 382—385.
5. Материалы для оптоэлектроники.— М.: Мир, 1976.
6. А. с. 913759 СССР. Устройство для жидкостной эпитаксии / А. В. Каримов, М. Мирзабаев, Ш. З. Миртурсунов, Н. Ф. Мухитдинова.— 1981.
7. А. с. 1037795 СССР. Способ эпитаксиального наращивания полупроводниковых соединений типа A^3B^5 / А. В. Каримов, Ш. З. Миртурсунов.— 1983.
8. Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Юлдашев Ш. Ш., Болтаева Ш. Ш. Физико-технологические основы получения резкого p - n перехода // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2006.— № 4.— С. 59—60.
9. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. Кн. 2.— М.: Мир, 1981.
10. Yodgorova D. M., Giyasova F. A., Karimov A. V., Khaydarov Sh. A. Analysis of influence of electrical field on space charge layer's thickness in Ag- n GaAs- n^+ GaAs-structures // Young Scientists Conf. Optics and High Tech. Mater. Sci. SPO-2006.— Kyiv.— 2006.— BP. 32.— P. 152—154.
11. Каримов А. В., Ёдгорова Д. М. Физические явления в арсенидгаллиевых структурах с микрослойным квазиизопериодическим переходом.— Ташкент: Фан, 2005.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Шерченков А. А., Штерн Ю. И. Физика и технология полупроводниковых преобразователей энергии: Уч. пособие. Часть 1.— М.: МИЭТ, 2006.— 164 с.

Рассматриваются основные вопросы физики и технологии полупроводниковых преобразователей энергии, принципы работы термоэлектрических элементов и приводятся их различные конструкции. Рассматриваются термоэлектрические преобразователи энергии, действие которых основано на использовании эффектов Пельтье или Зеебека.

Особое место в пособии занимает раздел, посвященный термоэлектрическим материалам и технологиям их получения. Рассмотрены факторы, влияющие на эффективность работы полупроводниковых преобразователей энергии.

Учебное пособие предназначено для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов.

К. ф.-м. н. Ю. В. БОЙКО, д. ф.-м. н. Г. В. КУЗНЕЦОВ,
С. М. САВИЦКИЙ, д. ф.-м. н. О. В. ТРЕТЯК

Дата поступления в редакцию
13.03 2007 г.

Украина, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко
E-mail: kuznetsov@uninet.kiev.ua

Оппонент д. ф.-м. н. Л. И. БЕРЕЖИНСКИЙ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Описан автоматизированный спектрометр для исследования параметров примесных и дефектных глубоких центров, поверхностных состояний в полупроводниковых структурах методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней.

Примесные и дефектные глубокие центры в полупроводнике и на его границах раздела существенно влияют на характеристики большинства полупроводниковых приборов. Одним из наиболее информативных и чувствительных методов контроля параметров примесных и дефектных центров является метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ), основанный на измерении и регистрации температурной зависимости релаксации емкости поверхностно-барьерной структуры после воздействия импульсного смещения [1, 2]. Этот метод позволяет исследовать характеристики глубоких уровней, связанных с электрически активными центрами (генерационно-рекомбинационными центрами, ловушками) в полупроводниковых структурах типа "р-п-переход", "металл—полупроводник" (барьер Шоттки), "металл—диэлектрик—полупроводник".

Для исследования такого широкого класса объектов необходимо обеспечение экспериментальной части, соответствующие методики анализа и обработки информации. Актуальной является задача расширения исследуемого энергетического спектра глубоких состояний, повышения чувствительности и точности измерений [3, 4]. Так, при исследовании структур с изолирующими оксидными слоями ("металл—оксид—полупроводник", кремний-на-изоляторе и т. п.) возникают проблемы, связанные с разделением роли поверхностных состояний на границах раздела и глубоких уровней в объеме полупроводника.

К усложнению процесса идентификации природы глубоких уровней приводит наличие в полупроводнике протяженных структурных дефектов (дислокаций, межфазных границ) [5]. Протяженные ростовые структурные дефекты электрически активны, являются местом скопления точечных дефектов, вызывают образование локальных упругих деформаций и электрических полей. Это приводит к уширению пиков в спектре РСГУ, логарифмической зависимости ам-

плитуды сигнала от длительности заполняющего импульса.

По принципу измерений емкости релаксационные спектрометры делятся на мостовые (с компенсацией стационарной емкости перед измерителем) и без компенсатора [2, с. 71—85]. Наличие компенсатора на входе позволяет расширить динамический диапазон измерений, повысить чувствительность. Однако такие спектрометры сложны в эксплуатации, возникают проблемы с калибровкой. Для анализа релаксационного сигнала наиболее часто используются стробируемые аналоговые дискриминаторы, выделяющие сигналы с характерным временем релаксации.

В настоящей работе описана автоматизированная система РСГУ для диагностики полупроводниковых структур, позволяющая повысить чувствительность измерений и упростить интерпретацию данных. Измерения проводятся методом стробирования с накоплением результатов в компьютере с помощью набора соответствующих программ управления и обработки данных. Спектрометр позволяет измерять равновесную и неравновесную вольт-фарадные характеристики, сигнал релаксации емкости при постоянном напряжении, изменение сигнала релаксации емкости от температуры.

Спектрометр обеспечивает работу в двух режимах. Обычный режим РСГУ — подается напряжение смещения, обеспечивающее максимальное обеднение исследуемого слоя. Сигнал РСГУ измеряется после подачи заполняющего импульса при выбросе носителей с глубоких уровней. Второй режим — подается прямое смещение, при котором ловушки заполнены. Сигнал РСГУ измеряется после подачи импульса обеднения при заполнении ловушек. Диапазон измерения емкости от 1 до 10^3 пФ при предельном разрешении порядка 10^{-3} пФ.

Наряду с методикой температурного сканирования при фиксированных значениях временного окна используется развертка по временному окну (от 10^{-6} с до 10 с). Установка позволяет за один температурный проход от 80 до 350 К записать спектры для четырех окон скорости эмиссии. Время релаксации емкости измеряется в интервале 4—320 с, причем в разные моменты релаксации емкости проводится сравнение интегральных за определенный отрезок времени емкостей образца. Длительность импульса запол-

нения (>4 мс) достаточна для обеспечения максимальной заселенности глубоких уровней.

Общая блок-схема релаксационного спектрометра представлена на **рис. 1**. Установка состоит из компьютера (оснащенного платой канала общего пользования и многофункциональной платой PCI-1710HG), аналоговой части, вольтметров и источников питания, интерфейсной части и криостата. Применение персонального компьютера в комплексе со спектрометром дает возможность автоматизировать процессы измерения и обработки результатов, упростить условия использования разных модификаций релаксационной спектроскопии глубоких уровней [6].

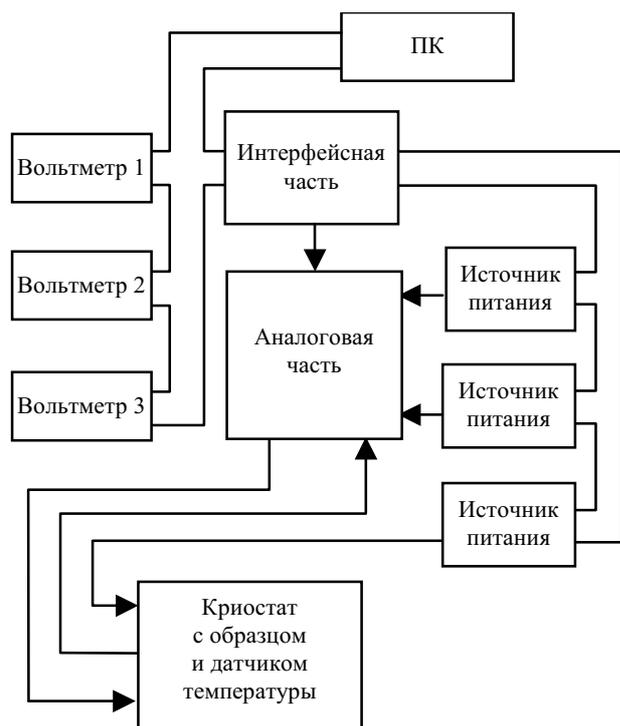


Рис. 1. Общая блок-схема автоматизированного релаксационного спектрометра глубоких уровней

Источники питания подводят нужные напряжения (заполнения, смещения) к аналоговой части и к криостату. Вольтметры предназначены для измерения напряжений, пропорциональных температуре, емкости, сигналу релаксации емкости. Персональный компьютер выполняет роль контроллера и предназначен для управления экспериментом. Роль сопряжения между компьютером и источниками питания и вольтметром выполняет интерфейсная часть спектрометра. Криостат предназначен для поддержания температуры в соответствующем диапазоне (77—400 К). В криостате находится нагреватель, датчик температуры, образец и резервуар для хладагента.

При повышении частоты измерительного сигнала глубокие центры не успевают перезарядиться, что позволяет расширить исследуемый диапазон постоянных времени эмиссии носителей. С другой стороны, слишком высокая ча-

стота измерительного сигнала накладывает ограничения на диапазон исследуемых структур и усложняет процесс измерения. Оптимальными для РСГУ-измерений являются частоты 0,1—100 МГц.

Блок-схема аналоговой части релаксационного спектрометра представлена на **рис. 2**. Устройство формирования включает задающий генератор, формирователи импульсов, опорного и измерительного сигналов, управляемый сумматор, усилитель высокой частоты, синхронный детектор, дискриминатор. Ниже перечислены основные функции составляющих аналоговой части спектрометра.

Задающий генератор. В качестве задающего генератора использовался низкочастотный прецизионный генератор сигналов типа ГЗ-122.

Формирователь опорного сигнала. Предназначен для получения высокочастотного сигнала, необходимого для работы синхронного детектора при исследовании импеданса образца. Формирователь опорного сигнала состоит из кварцевого генератора, формирователя прямоугольных импульсов и делителя, формирователя импульсов с заданным сдвигом фазы, буферного усилителя мощности и коммутатора. Быстродействующие микросхемы формируют сигналы в форме меандра со сдвигом фаз 0, 180, 90°. Первые два напряжения поступают на усилитель мощности и потом на синхронный детектор. В зависимости от состояния коммутатора на вход формирователя измерительного сигнала поступает напряжение с фазой 180° либо 90°.

Формирователь импульсов. Предназначен для создания набора импульсов, необходимых для работы управляемого сумматора и дискриминатора. Блок собран на основе счетчика импульсов, дешифратора и усилителей мощности.

Формирователь измерительного сигнала. Предназначен для преобразования прямоугольного напряжения в синусоидальное с последующим усилением и суммированием с напряжениями заполнения и смещения. Состоит из усилителя тока, фазосдвигающей цепочки, усилителя мощности и управляемого сумматора, в котором и происходит суммирование импульсного напряжения с высокочастотным сигналом.

Усилитель высокой частоты. Предназначен для усиления и получения прямого и инвертированного сигналов для работы синхронного детектора. Усилитель выполнен по двухканальной схеме на полевых транзисторах.

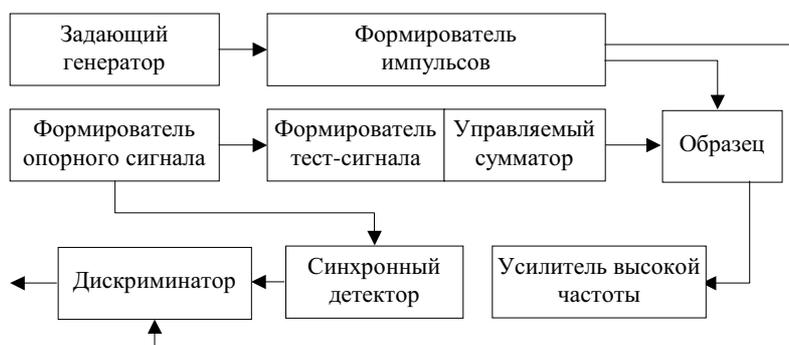


Рис. 2. Блок-схема аналоговой части релаксационного спектрометра

Синхронный детектор. С помощью этого блока осуществляется выделение постоянной сигнала с заданной фазой. Представляет собой двойной балансный смеситель, выполненный на диодах Шоттки.

Дискриминатор. Необходим для выделения процессов, которые происходят с заданной постоянной времени. Блок состоит из ключей на полевых транзисторах. На затворы полевых транзисторов подаются импульсы из формирователя импульсов. На выходе дискриминатора получаем сигнал, пропорциональный разности средних величин сигнала за два разных отрезка времени.

Интерфейсная часть спектрометра была специально разработана для подсоединения к компьютеру через линии канала общего пользования, а также линии многофункциональной платы PCI-1710HG вольтметра В7-34А и блоков питания ДЗ0-10-01А. Интерфейс состоит из следующих узлов: буфер шины, триггеры селектора адреса и дешифратора портов, блока индикации, буфера управляющих сигналов, блоков связи, многофункциональной платы PCI-1710HG.

Сигнал релаксации емкости преобразуется аналого-цифровым преобразователем и в цифровом виде передается в компьютер, где программно производится его усреднение с целью увеличения отношения сигнал/шум. Временная зависимость емкости исследуемой структуры $C(t)$ в заданном температурном диапазоне записывается в память компьютера, и далее по стандартной методике [2, с. 16—30] определяются параметры глубоких уровней.

Программная реализация данной методики позволяет получить результаты за один температурный цикл,

что существенно сокращает время измерений. Применение программных методов обработки релаксационных сигналов также дает возможность обрабатывать результаты по новым методикам и программам, которые позволяют увеличить точность и достоверность получаемых результатов.

Таким образом, применение предлагаемых методик анализа и программной обработки информации позволяет повысить точность и чувствительность измерений релаксационных сигналов, расширить диапазон исследуемых энергетических спектров глубоких состояний в полупроводниковых структурах, увеличить достоверность получаемых результатов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Lang D. V. Deep-level transient spectroscopy: a new method to characterize traps in semiconductors // J. Appl. Phys.—1974.— Vol. 45, N 7.— P. 3023—3032.
2. Берман Л. С., Лебедев А. А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках.— Л.: Наука, 1981.
3. Бойко Ю. В., Ильченко В. В., Третяк О. В., Зінчук В. М. Дослідження параметрів глибоких рівнів в напівпровідниках та структурах на їх основі // Наук. зап. Київськ. нац. університету ім. Тараса Шевченка.— 2004.— Т. 9.— С. 154—163.
4. Ветров О. П., Кузнецов Г. В. Ємнісний спектрометр глибоких рівнів // Вісник Київського університету. Сер. Фіз.-мат. науки.— 1994.— № 1.— С. 293—300.
5. Tretyak O. V., Skryshevsky V. A., Vikulov V. A. et al. Surface electronic states in metal-porous silicon — silicon structures // Thin Solid Films.— 2003.— Vol. 445.— P. 144—150.
6. Avila A., Reyes A. Computerized DLTS system to characterize deep levels in semiconductors // Rev. Mex. Fis.— 2002.— Vol. 48 (6).— P. 539—547.

Д. т. н. В. Н. КРЫЛОВ, к. т. н. Г. Ю. ЩЕРБАКОВА,
Ю. Ю. КОЗИНА

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: mokrickiy@mail.ru

Дата поступления в редакцию
09.01 2007 г.

Оппонент д. т. н. В. И. ОСИНСКИЙ
(НИИ микроприборов, г. Киев)

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФОТОШАБЛОНОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Разработана система автоматизированного оптического позиционирования фотошаблонов интегральных схем, которая имеет высокие показатели помехоустойчивости и точности.

Современное производство качественных интегральных схем предполагает применение систем автоматизированного оптического контроля (АОК) на ряде этапов, начиная с производства фотошаблонов (ФС). Целью системы АОК является выделение и анализ дефектов ФС посредством сравнения с эталонным ФС. Для этого должно быть обеспечено позициони-

рование (ориентация) изображения контролируемого ФС, т. е. определение и коррекция угла наклона, сдвигов и изменения масштаба относительно эталона.

Позиционирование ФС в современных системах АОК выполняется в оптико-электронном блоке с помощью сложной прецизионной механики и дорогостоящей осветительной аппаратуры. Снижение ресурсоемкости процесса АОК и требований к осветительно-фокусирующей аппаратуре могут позволить более совершенные методы обработки изображений. С этой целью предлагается проводить обнаружение и распознавание реперных знаков (РЗ) при обработке изображений с помощью системы автоматизированного оптического позиционирования ФС.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- провести анализ современных методов обработки изображений;
- разработать структуру системы контроля и распознавания РЗ;
- разработать информационную технологию системы контроля и распознавания РЗ;
- провести экспериментальные исследования в целях проверки помехоустойчивости метода.

Для решения задачи позиционирования при обработке изображений применяют различные методы — контурные, интегральные, характерных фрагментов [1, 2]. При использовании *интегральных* методов растут вычислительные затраты, поскольку параметры положения вычисляются по информации обо всем полутоновом изображении ФШ. Метод *характерных фрагментов* прост в реализации, имеет высокое быстродействие, но не обеспечивает инвариантность к сдвигу и повороту ФШ. В качестве характерных фрагментов в этом методе используются контактные площадки. *Контурный* метод существует в двух модификациях. В первой модификации производят совмещение по внешним границам ФШ, предполагая, что границы прямоугольные. Метод с высоким быстродействием, но точность его ограничена точностью изготовления и обнаружения внешних границ ФШ [1]. Во второй модификации для распознавания используются контуры РЗ — объектов известной формы, наносимых на поверхность фотошаблона. Для увеличения точности позиционирования применяются до четырех РЗ. При реализации этого метода необходимо произвести выделение и анализ контура с высокой помехоустойчивостью. Здесь объем вычислительных затрат хотя и снижается по отношению к интегральным методам, однако остается достаточно высоким. То есть остается потребность в разработке по-

мехоустойчивого метода, который позволит решать задачу позиционирования с высокой точностью и низкой ресурсоемкостью.

Системы автоматизированного оптического контроля состоят из оптико-электронного блока и системы обработки изображений. Оптико-электронный блок включает оптическую систему, датчик изображения (видеокамеру), двухкоординатный стол, осветительную систему и блок обработки видеосигнала, осуществляющий усиление, квантование и нормирование видеосигнала. Система обработки изображений представляет собой проблемно-ориентированный аппаратно-программный комплекс обработки и распознавания изображений [3]. На **рис. 1** представлена структурная схема системы АОК ФШ с разработанной системой обработки изображений, применяемой для автоматизированного позиционирования.

Для локализации (определения координат) объекта на изображении применяют пространственную низкочастотную фильтрацию (**ПНЧФ**) [4] и градиентный поиск (**ГП**) [5]. ПНЧФ размывает перепады интенсивности, которая содержит достаточно важную информацию об изображении. Для ГП скорость сходимости резко уменьшается при целевой функции типа “овраг”; результатом процедуры является не глобальный оптимум, а ближайший к начальной точке локальный; в присутствии шумов оценка градиента затруднена и поэтому направление поиска выбирается неправильно.

В работе предлагается для локализации РЗ использовать разработанный метод, который состоит в применении к изображению, которое обрабатывается, гиперболического вейвлет-преобразования (**ГВП**) [6].

$$HWT(s, x_0) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{s, x_0}(x) dx, \quad (1)$$

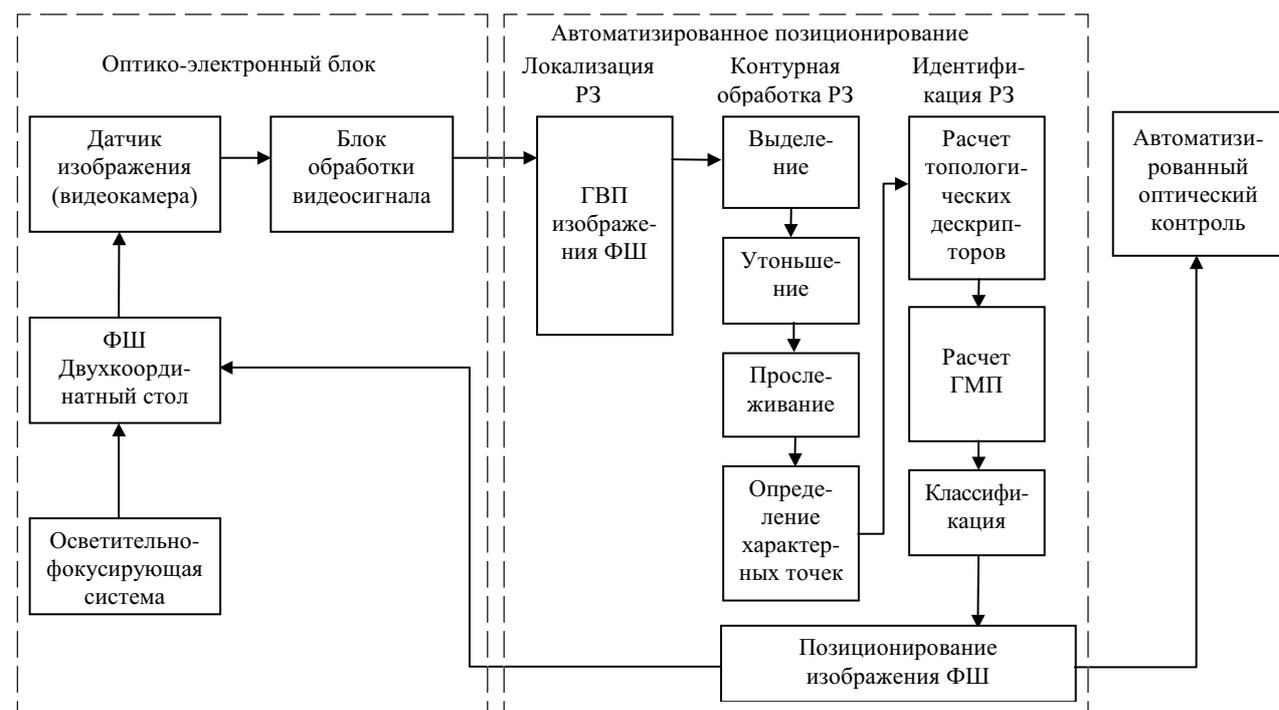
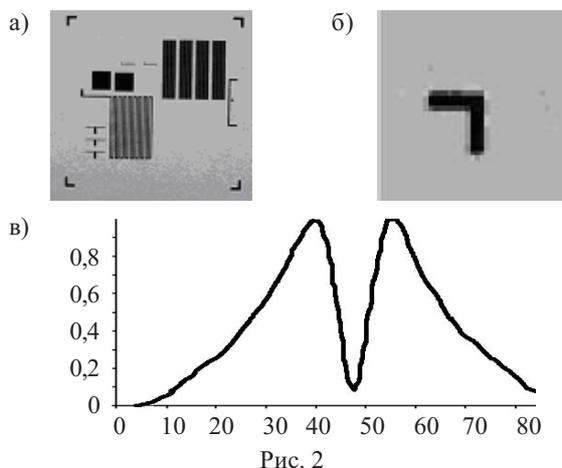


Рис. 1. Система автоматизированного оптического контроля фотошаблонов

где $f(x)$ — преобразуемая (анализируемая) функция (строка либо столбец изображения); $\psi_{s,x_0}(x)$ — двухпараметрическая базисная функция, получающаяся из материнского вейвлета $\psi_0(x) = 1/x$ в результате масштабирования с масштабным множителем $s \in R^+$ и сдвига с параметром $x_0 \in R$. Изменяя масштабный коэффициент s и величину сдвига вейвлетной функции, можно локализовать любые особенности изображения в пространстве масштабов. Данный метод позволяет расширить область пространственной локализации выделяемого РЗ.

На рис. 2 представлены изображение ФШ (рис. 2, а), область изображения ФШ с РЗ (рис. 2, б) и строка изображения в области ГВП (рис. 2, в).



Для поиска реперного знака предлагается следующая методика. Точки экстремума, которые определяют область перепада интенсивности, определяются с использованием регулярного итеративного алгоритма на основе ГВП. Для поиска РЗ использовался двухмерный пространственный алгоритм [6]:

$$HWT(x, y) = \frac{1}{\pi} \iint \frac{J(x, y)}{(\alpha x - x_1)(\alpha y - y_1)} dx_1 dy_1, \quad (2)$$

где x, y — пространственные координаты;
 $J(x, y)$ — интенсивность входного информационного поля;
 α — масштабный коэффициент.

При использовании этого метода для поиска РЗ появляется возможность найти как границы, так и центр строки (столбца) бинаризованного объекта, в котором ГВП равно 0. Концентрация энергии в области перепадов интенсивности создает благоприятные условия для последующего распознавания.



Рис. 3

Выделение и прослеживание контура РЗ выполнялось на базе алгоритма, основанного на морфологической обработке [7]. Выделенный и прослеженный контур РЗ представлен на рис. 3. В данном случае был выделен правый верхний РЗ.

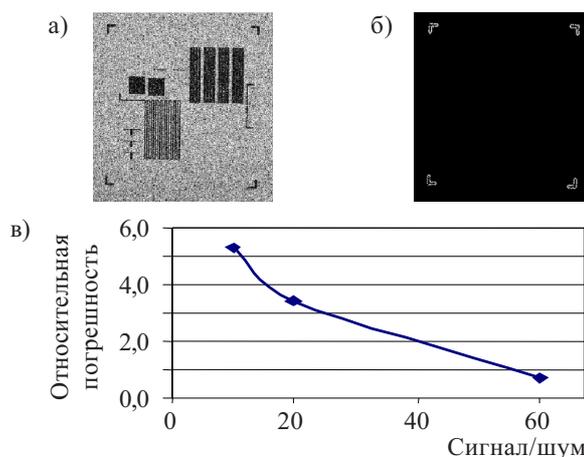
В целях проведения исследования помехоустойчивости метода исходное изображение ФШ предварительно было зашумлено с помощью добавления аддитивной гауссовской помехи со среднеквадратиче-

ским отклонением $\sigma_{\text{вых}}$. Отношение сигнал/шум определялось как

$$q = h^2 / \sigma_{\text{вых}}^2, \quad (3)$$

где h — высота перепада.

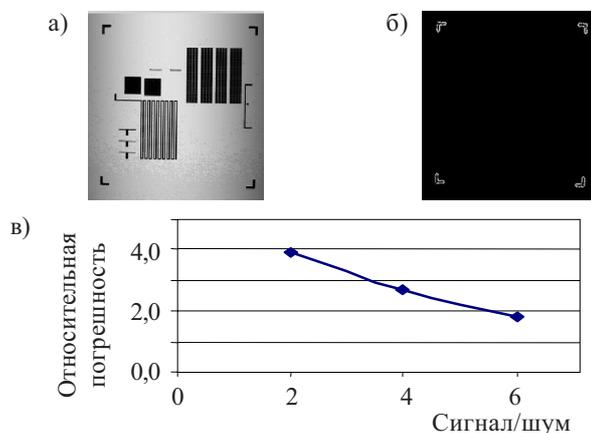
Определена погрешность полученных координат центров тяжести РЗ зашумленного изображения относительно эталонного. Известно, что для реализации задачи позиционирования ФШ в системе АОК погрешность совмещения не должна превышать $\pm 1,401$ мкм [8], что составляет 5% в относительных величинах. На рис. 4 представлено зашумленное изображение ФШ (а), выделенные РЗ зашумленного изображения (б) и график зависимости погрешности от отношения сигнал/шум для аддитивной помехи (в).



Для исследования работоспособности метода в условиях неравномерной освещенности изображение было подвергнуто наложению мультипликативной помехи. Мультипликативную помеху можно промоделировать, перемножив каждую строку изображения с некоторым стационарным сигналом. Уровень мультипликативной помехи оценивался следующим образом: каждая строка исходного изображения ФШ умножалась на синусоидальный сигнал $A \sin(x)$ в интервале $[0; \pi]$. Отношение сигнал/шум определялось как

$$p = S/A, \quad (4)$$

где S — уровень сигнала;
 A — амплитуда синусоиды.



На рис. 5 представлен результат добавления мультипликативной помехи (а), выделенные РЗ зашумленного изображения (б) и график зависимости погрешности от отношения сигнал/шум для мультипликативной помехи (в).

При идентификации для вычисления признаков формы РЗ была разработана следующая процедура [9].

1. Расчет топологического дескриптора (числа Эйлера) — разности между числом связанных компонентов и числом отверстий в изображении РЗ.

2. Расчет дескриптора области — компактности РЗ (отношение квадрата периметра к площади).

3. Расчет первых шести геометрических моментов-признаков (ГМП) с использованием информации о характерных точках [3].

4. Для РЗ формы квадрата и ромба вычисление эксцентриситета контура.

При формировании ансамбля признаков формы значения ГМП и компактности РЗ для ортогонализации подвергаются дискретному косинусному преобразованию (с целью устранения статистических связей между признаками). Далее производится минимизация пространства признаков с помощью оценки их информативности по Шеннону [10]. При этом информативность k -го параметра-признака для A_i ($i = 1, 7$) класса (типа РЗ) оценивается как разность начальной энтропии системы признаков и энтропии решения по этому параметру

$$I_k = H_0(A) - H(A/x_k), \quad (5)$$

где $H_0(A)$ — начальная энтропия системы;

$H(A/x_k)$ — энтропия решения по параметру x_k .

Информативность k -го параметра-признака определяется согласно выражению

$$I_k = -\sum_{i=1}^m p(A_i) \log p(A_i) + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^m p(A_i, x_{kj}) \log p(A_i, x_{kj}) - \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^m p(A_i, x_{kj}) \log \sum_{i=1}^m p(A_i, x_{kj}), \quad (6)$$

где $p(A_i)$ — априорные вероятности классов (приняты равновероятными);

$p(A_i, x_{kj})$ — совместное распределение вероятностей значений признака x_k для класса A_i .

В процессе расчетов было выявлено, что области изменения параметров-признаков знаков # и «крест» пересекаются. Это происходит при таком уменьшении масштаба, когда размер фрагмента знака # между характерными точками равен или меньше начального размера интерполяционного отрезка между ними. Эти знаки в пространстве признаков предлагается различать с помощью числа Эйлера. С учетом выше-

сказанного в ансамбль признаков рассматриваемых семи знаков включены первый и второй коэффициенты дискретного косинусного преобразования (с информативностью соответственно 0,7837 и 0,7697) и число Эйлера.

Классификация РЗ производится с помощью линейных решающих функций [11, с. 989] в двухмерном пространстве признаков — коэффициентов дискретного косинусного преобразования; если знак относится к области # или «крест» — дальнейшее разделение классов производится по величине числа Эйлера.

Выводы

Созданная на базе приведенных процедур система автоматизированного оптического позиционирования фотошаблонов позволяет распознавать реперные знаки инвариантно к масштабу и повороту ФШ в поле зрения. При этом система работоспособна при отношениях сигнал/помеха не менее 2 (по амплитуде) для мультипликативной помехи и не менее 10 (по мощности) для аддитивной помехи.

Результаты экспериментальных исследований показали, что разработанная система АОК ФШ имеет высокие показатели помехоустойчивости и точности, что позволяет за счет уменьшения требований к осветительно-фокусирующей системе снизить ресурсоемкость процесса контроля.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Задорин А., Захарова Г. Система автоматизации оптического контроля фотошаблонов и печатных плат с использованием стандартного сканера // Гироскопия и навигация.— 2001.— № 1.— С. 17—19.
2. Chan Steven. Automated inspection systems for the electronics industry // www.rsleads.com/508ee-207.
3. Крылов В. Н., Щербакова Г. Ю. Совмещение изображений в системах оптического контроля печатных плат // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2000.— № 1.— С. 23—25.
4. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин.— М.: Мир, 1972.
5. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах.— М.: Наука, 1968.
6. Антошук С. Г., Крылов В. Н. Обработка изображений в области гиперболического вейвлет-преобразования // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. (Херсон).— 2003.— № 2.— С. 7—10.
7. Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход.— М.: Вильямс, 2004.
8. Готра З. Ю. Технология микроразноустройств: Справочник.— М.: Радио и связь, 1991.
9. Щербакова Г. Ю., Крылов В. Н., Козина Ю. Ю. Идентификация изображений реперных знаков в системах АОК ИЭТ // МНПК “Современные информационные и электронные технологии”. Т. 1.— 2006.— Одесса.— С. 67.
10. Анисимов Б. В., Курганов В. Д., Злобин В. К. Распознавание и цифровая обработка изображений.— М.: Высш. шк., 1983.
11. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений.— М.: Техносфера, 2005.