

# ТРА

ТЕХНОЛОГИЯ И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ

С Новым годом!

2006

6(60) 2005

НОЯБРЬ — ДЕКАБРЬ



7-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

## «СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

22—26 мая 2006 года  
Украина, г. Одесса

- ◆ Прогрессивные информационные технологии и системы искусственного интеллекта
- ◆ Автоматизированные компьютерные системы
- ◆ Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- ◆ Экологический мониторинг

- ◆ Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств
- ◆ Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии
- ◆ Проблемы подготовки квалифицированных инженерных кадров в области радиоэлектроники и компьютерных систем

С текущей информацией  
можно ознакомиться на сайте  
<http://tkea.wallst.ru/konfer.html>

Реквизиты для связи  
E-mail <[tkea@optima.com.ua](mailto:tkea@optima.com.ua)>  
тел./факс +38 (048) 728-49-46,  
тел. +38 (048) 728-18-50.  
Секретарь Оргкомитета «СИЭТ-2006»  
Хлопова Маргарита

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ»

#### ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ



- Международная** Каталог периодических изданий Российской Федерации, стран СНГ и Балтийского региона. МК-PERIODICA. Индекс 71141.
- В Интернете** На сайте МК-PERIODICA ([www.periodicals.ru](http://www.periodicals.ru)). Индекс 71141.
- По Украине** Отделения связи. «Каталог изданий Украины». Индекс 23785. Подписное агентство «Идея», [www.idea.com.ua](http://www.idea.com.ua), Индекс 11146. Тел./факс +38 (062)381-09-32. Подписное агентство «KSS», [www.kss.kiev.ua](http://www.kss.kiev.ua), Индекс 20363. Тел. +38 (044)464-02-20. Подписное агентство «ПрессЦентр». E-mail: [info@prescentr.kiev.ua](mailto:info@prescentr.kiev.ua). Тел./факс +38 (044) 536-11-75, 536-11-80.
- По России** Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141. Представительство журнала «ТКЭА» в России: 192286 С.-Петербург, п/о 286, п/я 416; «ЭРА». E-mail: [era48@mail.ru](mailto:era48@mail.ru), тел. +7 (812)595-40-89.
- По Белоруссии** Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индексы 23785, 237852.
- Через редакцию «ТКЭА».

Адрес редакции: Украина, 65005, г. Одесса, ул. Прохоровская, 45.  
E-mail: [tkea@optima.com.ua](mailto:tkea@optima.com.ua), web-сайт: [tkea.wallst.ru](http://tkea.wallst.ru),  
тел. +38 (048)728-18-50, 728-11-89,  
тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, Л. М. Лейдерман,  
А. Н. Ошищенко, М. С. Назарова.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.  
Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

Журнал издается при поддержке  
Министерства промышленной  
политики Украины,  
НПП «Сатурн»,  
ЗАО «Украинлит»,  
Компани «Сатурн Дейта  
Интернешнл»  
(г. Киев),  
НПП «Карат» (г. Львов),  
СКБ «Молния»,  
Политехнического университета  
(г. Одесса),  
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

Подписано к печати 21.12 2005 г. Формат 60×84 1/8.  
Печать офсетная. Печ. л. 8,0. Уч.-изд. л. 9,9. Тираж 500 экз. Заказ № 39.  
Издательство «Нептун-Технология»  
(65005, г. Одесса, ул. Прохоровская, 45).  
Отпечатано в типографии издательства «ТЭС»  
(65012, г. Одесса, ул. Канатная, 81/2).

ТЕХНОЛОГИЯ  
И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ  
В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ

2005 № 6 (60)

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Год издания 29-й

Год регистрации 1992

Регистрационный номер  
КВ 2092 от 07.06.96 г.

Зарегистрирован в ВАК по разделам  
“Физико-математические науки”,  
“Технические науки”

Реферируется  
в Украинском РЖ “Джерело” (г. Киев)  
и в Реферативном журнале ВИНИТИ  
(г. Москва)

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР  
К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

К.т.н. Н. М. Вакив  
Д.т.н. В. Н. Годованюк  
К.т.н. А. А. Дашковский  
Д.т.н. Л. С. Лутченков  
Д.т.н. В. П. Малахов  
Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин  
В. А. Мингалёв  
Е. А. Тихонова

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. А. А. Ацеулов  
Д.т.н. В. В. Баранов  
Д.ф.-м.н. А. Е. Беляев,  
зам. гл. редактора  
К.т.н. Э. Н. Глушеченко,  
зам. гл. редактора  
Д.т.н. В. Т. Дейнега  
Д.ф.-м.н. В. А. Дроздов  
К.т.н. И. Н. Еримичой,  
зам. гл. редактора  
К.т.н. А. А. Ефименко,  
ответственный секретарь  
Д.ф.-м.н. Г. П. Ковтун  
Л. М. Лейдерман  
Д.т.н. С. Ю. Лузин  
К.т.н. И. Л. Михеева  
К.т.н. Ю. Е. Николаенко  
Д.ф.-м.н. В. В. Новиков  
К.т.н. В. В. Рюхтин  
Д.ф.-м.н. П. В. Серба  
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк

УЧРЕДИТЕЛИ

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

Техническая политика

Основные положения государственной программы развития техники и технологий СВЧ на 2005–2009 гг. в Украине. В. В. Луговский, Ю. Е. Николаенко, А. В. Демедюк, С. Ю. Ларкин 3

Электронные средства: исследования, разработки

Проблема прочностной надежности в радиоэлектронике. В. П. Ройзман 6

Алгоритм гибридного декодирования кодов Рида–Соломона без рекуррентных процедур. И. В. Иванова 12

Универсальная схема управления мощными высоковольтными МОП-инверторами, исключая тиристорный эффект. Г. И. Гаврилюк, Т. В. Маевская, В. В. Чечель, Н. Н. Шаран 16

СВЧ-техника

Проектирование биполярных микросхем широкополосных усилителей диапазона 40 МГц. В. П. Попов, Н. А. Тимошенко, Г. А. Слободянюк, Г. В. Чернецкая 20

Сенсоэлектроника. Датчики

Многофункциональный датчик давления и температуры на основе твердых растворов SiGe. А. А. Дружинин, И. П. Островский, С. М. Матвиенко, А. М. Вуйцик 24

Диодный сенсор температуры: анализ приборной погрешности измерения. А. Н. Иващенко, Ю. М. Шварц, М. М. Шварц 27

Функциональная микро- и нанoeлектроника

Микрочиповые лазеры с пассивной модуляцией добротности на основе эпитаксиальных структур Nd:АИГ/Сг<sup>+4</sup>:АИГ. И. И. Ижнин, Н. М. Вакив, А. И. Ижнин, И. М. Сыворотка, С. Б. Убизский 30

Интегральные схемы самосканируемых линейных фотоприемников в интроскопии и томографии. В. Л. Перевертайло, А. А. Епифанов, В. Г. Каренгин, Л. И. Тарасенко 33

Технологические процессы и оборудование

СВЧ плазмохимическое осаждение структур для высокоапертурных планарных оптических волноводов. В. В. Григорьянц, А. П. Долгов, Л. Ю. Кочмарёв, И. П. Шилов 39

Плазмохимическое травление эпитаксиальных структур нитрида галлия. А. Г. Борисенко, Б. П. Полозов, О. А. Федорович, Н. С. Болтовец, В. Н. Иванов, Ю. Н. Свеишников 42

Материалы электроники

Выращивание крупногабаритных монокристаллов вольфрамата кадмия с высокой оптической однородностью. И. М. Сольский 47

Обзор мирового рынка арсенида галлия. А. В. Наумов 53

Стандартизация

Система стандартизации в Украине. Л. П. Васильева 58

Библиография

Новые книги 19, 29, 38, 52

В портфеле редакции 5, 38, 46

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

2005 № 6 (60)

ТЕХНОЛОГІЯ  
ТА  
КОНСТРУЮВАННЯ  
В  
ЕЛЕКТРОННІЙ  
АПАРАТУРІ  
(російською мовою)

### ЗМІСТ

#### Технічна політика

Основні положення державної програми розвитку техніки та технологій НВЧ на 2005–2009 рр. в Україні. *Лугівський В. В., Ніколаєнко Ю. Є., Демедюк О. В., Ларкін С. Ю.* (3)

#### Електронні засоби: дослідження, розробки

Проблема міцнісної надійності в радіоелектроніці. *Ройзман В. П.* (6)

Алгоритм гібридного декодування кодів Ріда–Соломона без рекурентних процедур. *Іванова І. В.* (12)

Універсальна схема управління потужними високовольтними МОН-інверторами, що виключає тиристорний ефект. *Гаврилюк Г. І., Масвська Т. В., Чечель В. В., Шаран М. М.* (16)

#### НВЧ-техніка

Проектування біполярних мікросхем широкопasmових підсилювачів діапазону 40 МГц. *Попов В. П., Тимошенко М. А., Слободянюк Г. О., Чернецька Г. В.* (20)

#### Сенсоелектроніка. Датчики

Багатофункціональний датчик тиску та температури на основі твердих розчинів SiGe. *Дружинін А. О., Островський І. П., Матвієнко С. М., Вуйцик А. М.* (24)

Діодний сенсор температури: аналіз приладової похибки вимірювання. *Іващенко О. М., Шварц Ю. М., Шварц М. М.* (27)

#### Функціональна мікро- та наноелектроніка

Мікрочіпові лазери з пасивною модуляцією добротності на основі епітаксійних структур Nd:AlG/Cr<sup>4+</sup>:AlG. *Іжнін І. І., Ваків М. М., Іжнін О. І., Сиворотка І. М., Убізький С. Б.* (30)

Інтегральні схеми лінійних фотоприймачів із самоскануванням в інтроскопії та томографії. *Перевертайло В. Л., Єпіфанов О. О., Каренгін В. Г., Тарасенко Л. І.* (33)

#### Технологічні процеси та обладнання

НВЧ плазмохімічне осадження структур для високоапертурних планарних оптичних хвилеводів. *Григор'янц В. В., Долгов О. П., Кочмарьов Л. Ю., Шілов І. П.* (39)

Плазмохімічне травлення епітаксійних структур нітрида галію. *Борисенко А. Г., Полозов Б. П., Федорович О. А., Болтовець М. С., Іванов В. М., Свешников Ю. Н.* (42)

#### Матеріали електроніки

Вирощування великогабаритних монокристалів вольфрамата кадмію з високою оптичною однорідністю. *Сольський І. М.* (47)

Огляд світового ринку арсеніда галію. *Наумов А. В.* (53)

#### Стандартизація

Система стандартизації в Україні. *Васильєва Л. П.* (58)

### CONTENT

#### Technical polytic

The basic standings of the state program of development of technique and technologies of ultrahigh frequencies for 2005–2009 years in Ukraine. *Lugovski V. V., Nikolayenko Yu. E., Demedyuk A. V., Larkin S. Yu.* (3)

#### Electronic means: investigations, development

Problem of strength reliability in electronics. *Royzman V. P.* (6)

Algorithm of hybrid decoding of codes of Reed–Solomon without recurrence procedures. *Ivanova I. V.* (12)

The universal circuit of management of powerful high-voltage MOS-inverters excluding tiristors effect. *Gavrilyuk G. I., Mayevskaya T. V., Chechel V. V., Sharan N. N.* (16)

#### Microwave engineering

Design bipolar microcircuits wideband amplifiers with 40 MHz bandwidth. *Popov V. P., Timoshenko N. A., Slobodjanjuk G. A., Tschernetskaya G. V.* (20)

#### The sensoelectronics. Sensors

Multifunctional sensor of pressure and temperature based on Si–Ge whiskers. *Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P., Matviyenko S. N., Vujtsyk A. M.* (24)

The diode temperature sensor: an analysis of the instrument unsertanty. *Ivashchenko A. N., Shwarts Yu. M., Shwarts M. M.* (27)

#### The functional micro- and nanoelectronics

Microchip lasers with passive modulation of good quality on the basis of epitaxial structures Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG. *Izhnin I. I., Vakiv N. M., Izhnin A. I., Syvorotka I. M., Ubizskii S. B.* (30)

Integrated circuits of self-scanned linear photodetectors in introscopy and tomographies. *Perevertaylo V. L., Epifanov A. A., Karengin V. G., Tarasenko L. I.* (33)

#### Technological processes and development

Microwave plasmochemical deposition of structures for highaperture planar optical waveguide. *Grigorjantz V. V., Dolgov A. P., Kochmarev L. Yu., Shilov I. P.* (39)

Plasmochemical etching of epitaxial nitride gallium structures. *Borisenko A. G., Polozov B. P., Fedorovich O. A., Boltovets M. S., Ivanov V. N., Sveschnikov Yu. N.* (42)

#### Materials of electronics

Growth of large-sized cadmium tangstate single crystals with high optical homogeinity. *Solskii I. M.* (47)

The review of the global market GaAs. *Naumov A. B.* (53)

#### Standardization

System for standardization of the Ukraine. *Vasiljeva L. P.* (58)

К. ф.-м. н. В. В. ЛУГОВСКИЙ, к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО,  
А. В. ДЕМЕДЮК, к. т. н. С. Ю. ЛАРКИН

Украина, г. Киев, Министерство промышленной политики,  
Научно-производственный концерн "Наука"  
E mail: nikol@industry.gov.ua

Дата поступления в редакцию  
05.10 2005 г.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ СВЧ НА 2005–2009 гг. В УКРАИНЕ

*Приведена общая характеристика Государственной научно-технической программы развития в Украине сверхвысокочастотной техники и технологий в ближайшее пятилетие.*

Направление электронной сверхвысокочастотной техники охватывает довольно большой класс изделий (приборов, компонентов, устройств и модулей) сверхвысоких и крайневых частот (сантиметровые и миллиметровые волны, соответственно) в диапазоне от 100 МГц до 1000 ГГц. Изделия СВЧ-электроники представляют основу для создания радиоэлектронной аппаратуры разнообразного назначения. Уровень их электрических параметров и характеристик, надежности и эффективности в значительной мере предопределяет качество функционирования систем радиолокации, навигации, всех средств радиосвязи и передачи информации, включая радиовещание, телевидение, мобильную сотовую, радиорелейную и спутниковую связь.

Украина обладает высоким научно-техническим потенциалом в области электронной СВЧ-техники. Достаточно отметить, что во времена СССР в Украине был сосредоточен основной научный и технический потенциал, определяющий идеологию и уровень разработок в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Изделия СВЧ-техники, которые создаются научными организациями и изготавливаются отечественными предприятиями, не уступают по своим техническим характеристикам лучшим образцам зарубежных фирм. Уникальный научно-технический и производственный потенциал Украины в области миллиметровых технологий может стать основой экспорта наукоемких конкурентоспособных изделий приборостроения.

Развитие элементной базы СВЧ-техники в Украине целиком удовлетворяло потребности постоянных заказчиков и потребителей СВЧ-продукции и традиционно осуществлялось в следующих научно-технических направлениях:

- полупроводниковая элементная база СВЧ-электроники (НИИ "Орион", НПП "Сатурн", ОАО "Символ");
- СВЧ электровакуумные приборы (НИИ "Орион", завод "Генератор", ПО "Знамя");
- твердотельные СВЧ-приборы и устройства (НИИ "Орион", НПП "Сатурн", ПО "Знамя");

— комплексные СВЧ-системы на основе собственной элементной базы (НИИ "Орион", завод "Генератор", НПП "Сатурн", ПО "Знамя", Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Радиоастрономический институт НАН Украины);

— развитие и совершенствование научно-технической и производственно-технологической базы СВЧ-электроники (НИИ "Орион", завод "Генератор", НПП "Сатурн", ПО "Знамя", ОАО "Символ", Институт физики полупроводников НАН Украины).

Главными потребителями продукции электронной техники сверхвысоких частот в Украине являются предприятия Министерства промышленной политики (НИРТИ, г. Львов; ККБ "Луч", г. Киев; НИИ "Квант", г. Киев; КБ "Искра", г. Запорожье; НИИ КА, г. Донецк; ЖНИРЗ, г. Житомир и др.), Министерство обороны, предприятия и учреждения Министерства здравоохранения (в частности, ГУО "Политехмед"), а также предприятия России (ЗАО "Фазотрон", г. Москва; ЗАО "Тантал-наука", г. Саратов; КБ приборостроения, г. Тула; НИИ ЭП, г. Новосибирск и др.), Белоруссии, Китайской Народной Республики.

Учитывая ограниченные экономические возможности отраслевых научно-исследовательских учреждений, как никогда актуальной становится государственная поддержка вышеприведенных научно-технических направлений с целью разработки и промышленного выпуска наукоемких СВЧ-изделий, конкурентоспособных на мировом рынке, отвечающих современному научно-техническому уровню.

Министерством промышленной политики Украины разработана и утверждена постановлением Кабинета Министров Украины № 1372 от 15 октября 2004 года **Государственная программа развития техники и технологий сверхвысоких частот на 2005–2009 годы**. Программа разработана рабочей группой, в состав которой входили представители Министерства промышленной политики (Государственный заказчик программы), Национальной Академии наук, Министерства образования и науки, Министерства обороны и Национального космического агентства Украины. Головной организацией по разработке программы и ее сопровождению был определен Научно-производственный концерн "Наука".

В выполнении проектов программы предполагается участие более 40 научно-исследовательских учреждений Минпромполитики Украины, Министерства образования и науки, Национального космического

агентства, Национальной Академии наук Украины, в т. ч. таких как НИИ "Орион", НПП "Карат", ОАО "Чистые металлы", НПП "Сатурн", ОАО "Знамя", Институт радиофизики и электроники, Радиоастрономический институт, Научно-производственный концерн "Наука", НИЦ "Фонон", НТУУ "КПИ", ОАО "Символ", Институт физики полупроводников, Институт металлофизики, Институт магнетизма, КБ "Шторм", ННЦ "ХФТИ". В реализации программы будут заняты около 50 докторов наук, 170 кандидатов наук и 800 инженерно-технических работников.

Одним из приоритетных направлений программы является **разработка новых технологий сверхвысокочастотной электроники и приборостроения**. В этом разделе программы сосредоточено больше всего проектов — 20. Среди них:

— Разработка технологии изготовления усилителей с рекордно низкими шумами для приемопередающих модулей сверхвысокочастотного диапазона длин волн;

— Разработка автоматического электронного цифрового частотомера в диапазоне частот 60—600 гигагерц и исследование спектра электромагнитного излучения миллиметровых и субмиллиметровых длин волн на основе нестационарного эффекта Джозефсона;

— Разработка системы синтеза, анализа и оптимизации антенно-фидерных устройств сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн;

— Разработка радара миллиметрового диапазона для обнаружения и классификации движущихся объектов на участках земной поверхности, в частности, на аэродромах;

— Разработка измерителя мощности сверхвысокочастотных сигналов на основе магниторезистивных пленок с малой дисперсией анизотропии;

— Разработка базовых конструкций, изучение особенностей работы магнетронов миллиметрового диапазона длин волн и организация их изготовления на отечественных предприятиях;

— Повышение надежности мощных сверхвысокочастотных модулей двойного назначения в микроэлектронном исполнении;

— Разработка многопараметрического пассивного сверхвысокочастотного датчика для городского транспорта;

— Разработка полупроводниковых импульсно-когерентных приемопередающих устройств 8-миллиметрового диапазона длин волн в гибридно-интегральном исполнении;

— Создание базовой конструкции малошумящих высокостабильных сверхвысокочастотных гетеродинов в диапазоне 60—150 гигагерц;

— Разработка сверхвысокочастотных ферритовых приборов для создания и серийного производства твердотельной сверхвысокочастотной радиоэлектронной аппаратуры для авиации, связи, радиолокационных станций;

— Разработка ламп бегущей волны со специальными фазовыми характеристиками в 2-сантиметровом диапазоне длин волн и создание комплекса программ для проектирования мощных ламп бегущей

волны на цепочках связанных резонаторов с повышенным коэффициентом полезного действия;

— Разработка высокочувствительного приемника сигналов миллиметрового диапазона длин волн в микроминиатюрном исполнении;

— Разработка системы радиометрического изображения для таможенного контроля и борьбы с терроризмом;

— Разработка радиометрического комплекса для мониторинга серного ангидрида в атмосфере;

— Разработка комплекта автоматических электронных цифровых частотомеров непрерывных и импульсно-модулированных сигналов в диапазоне частот от 1,5 до 300 гигагерц и др.

**Современные технологии телекоммуникаций, сверхвысокочастотной связи и телевидения** будут разрабатываться в следующих проектах:

— Разработка универсальной микроволновой системы передачи данных;

— Разработка малогабаритных плоских и тонких волноводных антенных решеток миллиметрового диапазона с управляемой диаграммой направленности для систем связи;

— Разработка радиометрического комплекса для миллиметрового диапазона длин волн для обнаружения спрятанных под одеждой человека предметов;

— Разработка высокостабильного низкошумного криогенного преобразователя частоты на основе высокотемпературных сверхпроводников для систем телекоммуникаций Украины;

— Создание компьютерной радиотомографической системы ранней диагностики онкологических заболеваний молочной железы;

— Разработка преобразователей частоты в монолитном исполнении 5- и 3-миллиметрового диапазона длин волн;

— Разработка ряда сверхвысокочастотных мощных усилителей диапазона 2—8 гигагерц;

— Разработка приемного устройства 8-миллиметрового диапазона длин волн в гибридно-монолитном исполнении;

— Разработка системы телевизионного мониторинга удаленных объектов в аэро- и морских портах;

— Разработка базовой конструкции сверхмалошумных вибростойких синтезаторов частот с быстрым переключением для радиолокационных станций новых поколений;

— Разработка антенн с повышенным уровнем электромагнитной совместимости;

— Создание многоканального радиометрического приемника для систем радиовидения;

— Разработка станции тропосферной связи.

На современном этапе **развития сверхвысокочастотных технологий в космических системах** основными определены следующие проекты:

— Разработка диагностических методов и создание многоканальных средств для измерения субпиковаттных потоков излучения инфракрасного, субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн с применением наноразмерных сверхпроводящих элементов;

— Разработка высокочувствительного радиометрического приемного комплекса в миллиметровом

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

диапазоне длин волн (8 и 13,5 миллиметра) для оснащения радиотелескопа РТ-22 КрАО;

— Разработка приемопередающих модулей до частот 360 гигагерц;

— Разработка антенн для спутниковых систем телекоммуникаций сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн;

— Разработка полупроводниковых датчиков температуры для применения в ракетно-космической технике и атомной энергетике.

В разделе "**Элементная база сверхвысокочастотной техники с использованием полупроводниковых и электровакуумных технологий**" предусмотрено выполнение 15 проектов, в т. ч.:

— Создание технологии изготовления ультразвуковых сверхвысокочастотных линий задержки;

— Разработка базовой технологии и организация производства универсального микроэлектронного сенсорного модуля для горючих газов;

— Разработка и организация производства высоковольтных SiC *p*- и *n*-диодов для сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн;

— Разработка конструкции и технологии изготовления источников излучения для высокоточных дальномеров;

— Разработка технологии изготовления монокристаллических сред на основе эпитаксиальных структур гексаферритов для изготовления миниатюрных и субминиатюрных управляемых пассивных компонентов сверхвысокочастотных приборов;

— Разработка и внедрение технологии изготовления подложек для гетероструктур на основе  $A_3B_5$ , предназначенных для сверхвысокочастотных приборов;

— Разработка и внедрение технологии изготовления сверхчистых веществ для создания материалов сверхвысокочастотной электроники;

— Разработка технологии и модернизация технологической базы изготовления сверхмощных кремниевых лавинно-пролетных диодов 8-миллиметрового диапазона импульсного режима работы;

— Разработка технологии и модернизация производства 2-электродных генераторных активных элементов из арсенида галлия с повышенными энергетическими характеристиками для диапазона частот 30—100 гигагерц;

— Разработка и внедрение технологии производства мощных высоковольтных кремниевых сверхвысокочастотных *p-i-n*-диодов с пробивным напряжением 1000—2000 вольт для перспективных радиотехнических систем широкого назначения;

— Разработка технологии производства карбид-кремниевых микроволновых планарных диодов с барьером Шоттки;

— Разработка ламп бегущей волны;

— Разработка и поставка твердотельных сверхвысокочастотных компонентов и модулей миллиметрового диапазона длин волн.

Раздел "**Стандартизация, метрологическое и информационное обеспечение**" предполагает выполнение работ:

— Исследование возможности создания стандарта Вольта переменного напряжения на основе сверхпроводниковых матриц элементов Джозефсона;

— Разработка комплекса прецизионных физико-химических методов контроля материалов и структур в технологии производства высоконадежных сверхвысокочастотных приборов;

— Систематизация научных достижений по Программе и распространение результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на предприятиях Украины.

Выполнение проектов программы будет способствовать развитию отечественной сверхвысокочастотной электроники, обеспечит разработку, создание и внедрение в производство конкурентоспособных наукоемких технологий и перспективных изделий электронной сверхвысокочастотной техники. Конкурентоспособность СВЧ-продукции будет обеспечена или за счет существенного улучшения ее технических характеристик в сравнении с зарубежными аналогами, или же за счет более низкой цены в сравнении с аналогичной импортной продукцией, которая закупается государством для собственных нужд.

Результаты разработок будут использованы в радиотехнической, авиационной, судостроительной, ракетно-космической, автомобильной промышленности и др.

Предлагаемые научно-технические разработки направлены, главным образом, на серийное отечественное производство приборов и систем электронной техники, что должно позволить создать новые рабочие места. Важным общим результатом выполнения Программы должны стать поддержка и сохранение имеющегося научно-технического потенциала, привлечение молодых специалистов, подготовка квалифицированных кадров, обеспечение преемственности в развитии этого чрезвычайно перспективного направления.

в портфеле редакции

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

- Комплекснолегируемые эпитаксиальные структуры InP/InGaAsP для СВЧ и оптоэлектроники. (Украина, г. Львов)
- Особенности топологии поверхности слоистых кристаллов  $In_4Se_3$ . (Украина, г. Львов)
- Исследование изменений структур поверхности пластин фотоэлектрических преобразователей при плазмохимическом травлении. (Украина, г. Киев)
- Физико-технологические аспекты изготовления и корпусирования GaAs-диодов Ганна, работающих в диапазоне коротких миллиметровых длин волн. (Украина, г. Киев)
- Монолитный приемник с низким потреблением мощности диапазона 33—37 ГГц. (Украина, г. Киев)
- Исследование характеристик монолитных преобразователей частоты 5- и 3-миллиметрового диапазона. (Украина, г. Киев)

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

в портфеле редакции

Д. т. н. В. П. РОЙЗМАН

Украина, Хмельницкий национальный университет  
E-mail: roizman@mailhub.tup.km.ua

Дата поступления в редакцию  
20.09 2005 г.

Оппонент д. т. н. Л. С. ЛУТЧЕНКОВ  
(НПП "ЭлектроРадиоАвтоматика",  
г. С.-Петербург)

## ПРОБЛЕМА ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

*Обосновывается актуальность проблемы механической прочности для изделий радиоэлектроники и сообщается о вкладе хмельницких ученых в решение этой проблемы.*

Тенденция к снижению массы, получению высокой плотности монтажа и обеспечению герметичности при создании радиоэлектронных систем привела к снижению жесткости элементов, деталей и узлов их (достаточно сложных) конструкций. Эксплуатация таких изделий из новых неметаллических материалов с недостаточно изученными механическими свойствами в условиях эксплуатации различных объектов военной и гражданской техники (ракет, самолетов, бронемашин, судов, автомобилей, радиолокационных станций, стационарных, возимых и носимых радиостанций, компьютеров и др.) при больших перепадах температур и давлений нередко приводит к отказам из-за нарушения целостности отдельных частей или разгерметизации. В радиоэлектронике из-за действия внешних нагрузок или несовершенных технологий изготовления в изделиях возникают напряжения, от действия которых происходит отклонение их параметров за пределы технических условий, что зачастую приводит к отказам еще задолго до поломки. Цена таких отказов бывает очень высокой. (Так, разрушение резистора стоимостью в 0,5 доллара привело в США к гибели ракеты стоимостью 140 миллионов долларов, поломка вывода одной из недорогих микросхем привела к потере связи с опущенным на Венеру и работавшим там аппаратом.)

При анализе причин отказов в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) традиционно считают, что 40—45% всех отказов в эксплуатации происходит от ошибок, допущенных на этапе их проектирования, 20% обусловлено несовершенством технологических процессов изготовления, а также недостаточным уровнем технологической дисциплины, 30% вызвано неправильными режимами эксплуатации и нарушениями правил технического обслуживания и около 5—7% связано с естественным износом составных частей и старением материалов. В приведенной классификации, однако, не учитывается тесная взаимосвязь, например, конструкторских и технологических причин отказов РЭА. Решение же проблемы обеспечения качества РЭА требует не только уче-

та всех этапов их «жизненного цикла» (проектирование, доводка, производство и эксплуатация), но и взаимного влияния этих этапов. Так, на практике весьма часто недостаточная надежность самих технологических процессов изготовления РЭА обусловлена недостаточным уровнем производственной технологичности их конструкций и применяемой элементной базы. Более того, проекты некоторых систем, в основу которых были положены весьма прогрессивные принципы их действия, остались нереализованными только потому, что оказались недостаточно технологичными: слишком трудоемкими и непригодными для производства.

Наиболее общей тенденцией в развитии радиоэлектронной техники является сочетание все большей интеграции выполняемых ею функций со все большей ее микроминиатюризацией. Следствием этого является резкое усложнение конструкций современной РЭА и технологических процессов ее изготовления. Так, технология изготовления современных микросхем практически не допускает корректировки их структуры и параметров в процессе изготовления, проще создать новую микросхему, чем скорректировать уже имеющуюся. Это резко уменьшает возможность экспериментальной доводки (наладки и оптимизации) и, соответственно, требует своевременной отработки основных вопросов технологичности конструкций РЭА и вопросов повышения надежности технологических процессов ее изготовления с одновременным повышением точности проводящихся при этом теоретических расчетов.

Анализ конструкторских особенностей современных РЭА показывает, что решение задач обеспечения влагозащиты и стойкости при изменениях температуры и давления окружающей среды привело к использованию новых материалов с недостаточно изученными свойствами, к соединению разнородных материалов. Возникающие в таких конструкциях механические взаимодействия могут оказывать существенное влияние как на протекание основных электрических процессов, так и на работоспособность изделия в целом. Однако работы по проектированию РЭА зачастую ведутся в основном в чисто радиотехническом (схемном) направлении, без должных расчетов на прочность, без измерений напряжений и оценки напряженного состояния конструкций в целом и их отдельных элементов. Между тем современные тре-

бования и будущее радиоэлектроники, а также области ее использования, выдвигают наряду с чисто радиотехническими задачами проблему обеспечения механической прочности и надежности.

При эксплуатации радиокомпоненты и функциональные узлы могут работать при температуре от  $-65$  до  $+250^{\circ}\text{C}$ , с вибрационными частотами от 1 до 5000 Гц, при ускорении до 40 g, подвергаться ударам с ускорением до 120 g, относительная влажность может изменяться от 5 до 100%, атмосферное давление — в пределах  $6,6 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^5$  Па, фоновое излучение (проникающая радиация и гамма-излучение) может достигать  $10^{10}$  рад/с. В некоторых случаях эти воздействия могут быть еще более жесткими [1].

Механические воздействия оказывают существенное влияние на надежность изделий радиоэлектроники и вызывают от 30 до 50%, а в авиации — до 80% всех ее отказов, ухудшают точность и другие параметры аппаратуры. При этом надежность всего изделия в целом, его безотказность в работе во многом определяются надежностью составляющих его элементов. Следует учесть, что число элементов в радиоэлектронной аппаратуре за каждые 5 лет увеличивается в 2—5 раз.

Наиболее опасными из указанных факторов являются вибрационные и ударные нагрузки, акустические воздействия, дорожная тряска, выстрелы, неуравновешенности быстровращающихся деталей, ударная волна, резкие порывы ветра, быстрые турбулентные потоки и т. п. Возможные диапазоны частот вибраций радиоэлектронных средств (РЭС), установленных на различные подвижные объекты, и максимальные амплитуды колебаний приведены в **таблице** [2, с. 22].

Исследования показали, что действующие нагрузки приводят к разрушению отдельных деталей и узлов радиоэлектроники (резисторов, конденсаторов, плат, микромодулей и других деталей) либо к изменению радиотехнических параметров электрорадиоэлементов и узлов (разбалансировка контуров, микрофонный эффект и т. п.). Например, у радиолокационных и сканирующих антенн возможны отклонения зеркала из-за вибрации элементов привода и люфтов в соедине-

ниях, в результате чего могут возникать периодические отклонения антенны от ее нормального положения, колебания зеркала и облучателя, что может привести к полному нарушению функционирования станции и (или) отклонению от цели летящей ракеты [3].

При вибрационных воздействиях в выводах РЭА возникают знакопеременные механические напряжения. Это приводит к накоплению усталостных повреждений в материалах выводов и при длительном воздействии вибрации может привести к обрыву выводов. Усталость является причиной 80% отказов электронных элементов. В полной мере эти данные относятся к испытаниям на воздействие широкополосной случайной вибрации [2, 4, 5].

В процессе ударных воздействий, возникающих при транспортировке, монтаже или эксплуатации, при действии ударной волны и т. д., нагрузки к элементам аппаратуры прикладываются в течение короткого промежутка времени. Вследствие этого возникающие ускорения, перемещения и напряжения в элементах аппаратуры могут достигать больших значений и вызывать различные повреждения. Интенсивность ударного воздействия зависит от формы, амплитуды и длительности ударного импульса. При периодическом приложении ударных импульсов блок РЭА на упругих опорах приходит в колебательное движение. Таким образом, возникает необходимость одновременной защиты от колебаний и ударов.

Линейные ускорения характерны для всех объектов, движущихся с переменной скоростью (например, при разгоне, торможении). Влияние линейных ускорений на детали конструкций и радиоэлементы обусловлено инерционными силами, которые могут во много раз превышать силы тяжения. При движении объекта по криволинейной траектории, например по дуге окружности, элементы конструкции аппарата будут испытывать центробежное ускорение. Трудность борьбы с влиянием линейных перегрузок заключается в том, что они практически не поддаются ослаблению. Только в случае действия линейных перегрузок могут быть использованы некоторые конструкторские меры защиты. Во всех же остальных случаях обеспечение нор-

*Диапазоны частот вибраций и максимальные амплитуды колебаний для различных РЭС*

| Вид РЭС   | Частота вибраций, Гц | Максимальная амплитуда, мм |
|---|----------------------|----------------------------|
| Наземные, устанавливаемые в транспортных средствах: |                      |                            |
| в кузовах автомашин                                 | 0—80                 | 1,0—2,5                    |
| на тракторах, бронетранспортерах колесного типа     | 8—15                 | 1,0                        |
| на тракторах гусеничного типа                       | 400—700              | 0,25                       |
| на танках   | 20—2000              | 0,25                       |
| Наземные переносные                                 | 10—120               | 0,15—2,5                   |
| Самолетные:   |                      |                            |
| на самолетах с поршневым двигателем                 | 5—150                | 0,15—5,0                   |
| на самолетах с реактивным двигателем                | 5—500                | 0,025—0,3                  |
| Ракетные: на участке разгона ракет                  | 30—5000              | 1,0—3,0                    |
| Корабельные:  |                      |                            |
| на судах большого тоннажа                           | 5—150                | 1,0                        |
| на судах малого тоннажа                             | 2—10                 | До 35                      |
| Эксплуатируемые на железнодорожном транспорте       | 2—150                | 25                         |

мативных требований к элементам конструкции может быть достигнуто только за счет увеличения их жесткости, что ведет к увеличению массы.

Воздействие акустического шума приводит к механическому возбуждению деталей и узлов конструкций РЭА, а также различных радиоэлементов [6]. Отличие данного вида возбуждения от вызванного колебаниями заключается в распределенном воздействии усилий, зависящих не только от уровня звукового давления, но и от площади изделия. При чисто механических воздействиях вибрация передается изделиям главным образом через точки крепления. В технических заданиях на разработку бортовых РЭА звуковое давление, создаваемое акустическим шумом, задается до 175 дБ в диапазоне частот от 10 до 10000 Гц. Давление в столь широком диапазоне частот может привести к существенным поломкам в аппаратуре, в том числе к усталостным, из-за резонансных колебаний.

Наличие тепловыделяющих элементов в составе конструкций РЭА в сочетании с широким диапазоном температур окружающей среды приводит к появлению паразитного теплового фактора, оказывающего существенное влияние на механические процессы, в том числе за счет появления температурных напряжений. При этом от температуры зависят такие физико-механические параметры как модуль упругости, логарифмический декремент затухания колебаний (ЛДК), предел выносливости и другие. Квалификационные испытания цифровых блоков РЭА показали, что около 30% отказов отдельных элементов, которые были зафиксированы при воздействии низкой и высокой температур, в действительности обусловлены повреждением этих элементов в процессе комплексного воздействия колебаний и температуры [7]. Таким образом, необходим учет комплексности воздействия механических факторов и температуры для адекватного принятия мер по обеспечению нормативных требований.

К монтажным (объединительным) платам, подложкам электронных изделий тем или иным способом крепится большое количество электронных элементов, микросхем, микросборок, модулей, микромодулей и других составляющих сложного электронного изделия. При эксплуатации изделий в результате изменения температуры, давления и других параметров внешней среды, а также из-за вибраций, перегрузок объединительные платы деформируются, и эти деформации могут передаваться на элементы навесного монтажа и в сочетании с другими воздействиями вызывать в последних поломки или приводить к отказам.

С другой стороны объединительные платы уже после изготовления могут иметь коробление, и на такие платы также могут устанавливаться изделия. В результате деформации объединительной платы или выравнивания коробленной платы с установленными на ней изделиями в последних возникают напряжения, которые, достигнув некоторого значения, могут нарушить нормальную работу изделия.

Для повышения надежности работы изделия необходимо изучить взаимодействие объединительной платы с элементами навесного монтажа в различных

условиях, определить возникающие при этом деформации и напряжения как в самих платах, так и в контактных узлах и элементах.

Как показывает практика [8], наиболее часто отказы интегральных схем происходят из-за нарушения электро монтажа, разгерметизации, обрыва выводов корпусов и подложек, а также из-за изменения параметров полупроводниковых структур под влиянием механических воздействий. Существенное влияние на отклонения параметров интегральных схем оказывает не только величина напряжений, но и вид напряженного состояния.

**П**роблема прочностной надежности и сейчас продолжает оставаться одной из острых проблем современной радиоэлектроники.

К сожалению, в институтах и на факультетах радиоэлектроники механика практически не изучалась, да и теперь недостаточно изучается. Современным инженерам по радиоэлектронике трудно разбираться в причинах поломок и производить необходимые расчеты и эксперименты на колебания и прочность в процессе проектирования и доводки изделий. До сих пор (в отличие от других отраслей техники) не существует «Норм прочности» на изделия радиоэлектроники, не установлены зависимости между напряжениями и отклонениями электрических параметров. (Нормы прочности — это свод нормативных документов, определяющих количественные значения коэффициентов запасов прочности типовых элементов и узлов изделий, обязательность их расчетов на прочность и колебания, а также экспериментальных проверок, и методики самих расчетов и необходимых экспериментов.)

В этих условиях еще в 1972 г. академик А. И. Берг обратился с письмом к тогдашнему министру высшего образования СССР с призывом восстановить изучение теоретической механики и сопротивления материалов в радиотехнических институтах и факультетах.

Однако введение 90-часового курса механики, объединяющего курс теоретической механики, сопротивления материалов, теории машин и механизмов и деталей машин, лишь незначительно улучшило положение. И только в отдельных вузах — в Харьковском национальном университете радиоэлектроники, Пензенском политехническом университете, Московском университете электроники и математики и Хмельницком национальном университете (а теперь, возможно, и в некоторых других) — изучаются курсы по влиянию механических воздействий на надежность радиоэлектронной аппаратуры и защите от этих воздействий.

Между тем было бы полезно в рамках специальности «Динамика и прочность машин» открыть в нескольких вузах специализацию «Динамика и прочность радиоэлектронной аппаратуры».

В шестидесятые годы прошедшего столетия в Хмельницкой области Украины интенсивно развивались предприятия радиоэлектронной промышленности с ориентацией на нужды обороны СССР. Появились и приобрели вес такие крупные предприятия как ПО «Новатор», НПО «Катион», заводы «Темп», «Нева», приборостроительные и другие. Поначалу эти

предприятия выпускали серийную продукцию, разработчиками которой были ведущие научно-исследовательские институты Москвы и Ленинграда, а затем и сами стали создавать и производить образцы новой радиоэлектронной техники.

Однако в процессе производства и эксплуатации отечественных изделий на летательных аппаратах или других быстро движущихся объектах в условиях вибраций, ударов, теплосмен имели место отказы изделий из-за механических поломок, растрескиваний, разгерметизации, ухода радиотехнических параметров за пределы, оговоренные техническими условиями. Эти отказы были вызваны не только несовершенством технологии изготовления на серийных заводах, но и ошибками разработчиков, не уделявших должного внимания вопросам прочности создаваемых конструкций.

Борьба с этими дефектами оказалась затруднительной для специалистов по радиоэлектронике, практически не изучавших в вузах цикла механических дисциплин, поэтому в 1970 г. для исследования и ликвидации прочностных дефектов были привлечены специалисты кафедры сопротивления материалов Хмельницкого высшего артиллерийского командного училища (ХВАКУ) — прочнисты, имевшие опыт работы по исследованию и устранению прочностных дефектов в авиационной промышленности.

Сотрудничество оказалось плодотворным. Было показано, что теория расчета на прочность стволов артиллерийских орудий — теория Ляме–Гадолина — может быть использована для построения теории расчета на прочность и герметичность типовых элементов и узлов герметизируемых изделий электронной техники. И хотя природа действующих сил в обоих случаях совершенно различна (в первом случае это громадное давление пороховых газов в канале ствола, а во втором — контактные давления на границах сопрягаемых материалов), основные уравнения равновесия оказались удивительно похожими.

Вскоре ученые ХВАКУ работали уже не только с предприятиями г. Хмельницкого, но и с ведущими научно-исследовательскими и производственными объединениями Советского Союза: Центральным научно-исследовательским радиотехническим институтом (ЦНИРТИ), г. Москва, научно-производственными объединениями «Позитрон», «Авангард», «Вега» (Санкт-Петербург), ПО «Коммунист» (Киев), предприятиями Харькова, Витебска, Черновцов и др. Высокая оценка и поддержка этих работ были получены со стороны ведущего ученого в области радиоэлектроники акад. А. И. Берга и Министра радиопромышленности СССР П. С. Плешакова. Были выделены необходимые средства для проведения исследований.

Следует отметить, что в то время подобных работ было крайне мало, и они внесли существенный вклад в развитие нового научного направления — обеспечения прочностной надежности изделий радиоэлектроники. Исследования проводились в основном на закрытых объектах и потому нашли малое отражение в печати, но сохранились более чем в двухстах пятидесяти научно-технических отчетах.

После ликвидации ХВАКУ работы были продолжены в Хмельницком национальном университете и получили новый толчок — новое направление, основанное на использовании явления акустической эмиссии для неразрушающего контроля, диагностирования и прогнозирования прочности, т. е. для заблаговременного предупреждения о наступлении опасных состояний и недопущении отказов изделий. Несмотря на спад производства и недостаточное финансирование, исследования в области прочностной надежности продолжают, на материалах этих работ ведется подготовка специалистов по динамике и прочности приборов и аппаратуры.

После распада Советского Союза к этим работам был проявлен большой интерес за рубежом. Исполнители исследований несколько раз приглашались в США различными организациями, в том числе НАСА и «Боинг», и выступали с лекциями и докладами по отдельным несекретным разделам проведенных исследований. По приглашению НАТО и Европейской комиссии были прочитаны обзорные лекции по проблеме прочности в электронике в Норвегии на Европейском форуме по силовой электронике. Отдельные фрагменты докладывались в Японии, Франции, Китае и других странах.

Эти работы отличает научность, высокая степень внедрения и экономический эффект на предприятиях — разработчиках изделий, на заводах, выпускающих серийную продукцию, и в эксплуатирующих организациях в Украине, России, Белоруссии, Армении. Как свидетельствуют проведенные тогда расчеты и акты внедрения, на 1 рубль затрат на эти работы государство в те годы получало не менее 100 рублей дохода только за счет снижения затрат на заводах-изготовителях.

**В**ыполненные работы, как и всю проблему механической прочности, можно разделить на три взаимосвязанные части: это статическая прочность, динамическая прочность и неразрушающий контроль, диагностика и прогнозирование прочности.

В рамках одной журнальной статьи невозможно изложить теоретические и экспериментальные материалы по выполненным исследованиям, поэтому укажем только, что было сделано, — со ссылками на некоторые публикации.

*По статической прочности.*

Разработаны теоретические основы расчета на прочность типовых компаундированных элементов электронной техники: конденсаторов, резисторов, герметизируемых конструкций микромодулей, фоторезисторов, узлов герметизации приборов и микроприборов, интегральных микросхем, стеклоспаев и других с учетом температурных полей, контактных давлений, эксплуатационных факторов, разбросов значений физико-механических характеристик сопрягаемых материалов, а также предельных напряжений, — с учетом дефектов структуры материалов [9].

Из условия обеспечения прочности решена множественная обратная задача обоснованного назначения допусков на физико-механические характеристики материалов и геометрические размеры сопрягаемых деталей. При этом разработан метод определения доверительных интервалов допустимых значений

характеристик при многомодальном законе распределения их вероятностей и тем самым получен общий метод обработки статистических материалов при любом законе их распределения.

На базе метода конечных элементов проведен анализ напряженного состояния изделий электронной техники (ИЭТ) типа «изделие—герметик» в упругопластических областях с учетом изменения свойств материалов при изменении температуры. Предложен расчетно-экспериментальный способ и формулы для идентификации физико-механических свойств керамики и компаунда в ИЭТ с учетом влияния температуры.

Проведено теоретическое исследование проблемы прочности ИЭТ, поставленной и решенной в рамках линейной механики разрушения (с учетом реальной структуры материала). Проанализирована проблема большого (300—500%) разброса механических характеристик применяемых материалов, не подчиняющихся одномодальным законам распределения [10].

Рассмотрена проблема короблений и деформаций печатных плат и подкладок корпусов и задачи возникающих усилий на элементы. На этой основе была издана отраслевая «Инструкция по установлению допустимых короблений печатных плат». Проанализированы монтажные напряжения, зависимость прочности элементов от влияния технологических операций отрезки, формовки, зачистки выводов, а также от влияния концентраторов напряжений; мероприятия по снижению этих влияний внедрены в производство.

Рассмотрена прочность монолитных, пустотелых и полупустотелых конструкций модулей при изменении внешнего давления и выданы рекомендации по условиям применения каждой из них.

Разработан метод тензометрирования ИЭТ с учетом влияния поперечной чувствительности проволочных петлевых тензодатчиков, анизотропии физико-механических свойств материалов и краевых эффектов, с возможностью регулировки тока питания малобазных тензорезисторов, произведен отбор и доработка аппаратуры для измерения деформаций натурных ИЭТ. Это позволило впервые измерить и получить реальные значения деформаций плат, пассивных электронных элементов, контактных узлов, выводов, стеклоспаев в эксплуатационных и лабораторных условиях, определить время окончания полимеризации компаундов и сократить время проведения термоударов в конкретных изделиях.

Разработаны методы контроля на герметичность и высотность, определения реальных коэффициентов запаса прочности и демпфирования, сравнения эффективности применения герметиков и защитных покрытий, определения остаточных деформаций.

Разработана методика оценки запаса прочности по предельным состояниям элементов, воспроизводимым в реальных конструкциях в условиях эксплуатации. Экспериментально подтверждены теоретические положения.

Произведен расчет на прочность и герметичность керамических резисторов типов ОМЛТ-0,1256, ОСМЛМ-0,125, С2-23-0,062, конденсаторов КМ-5в, К10-9, К10-17, К15-5, К78, герметиков.

Расчетным и экспериментальным путем исследовано взаимодействие компаундов 9 типов, защитных покрытий 15 типов с электрорадиоэлементами в конструкциях ИЭТ, влияние конструкторско-технологических мероприятий, направленных на повышение работоспособности изделий; оптимальные из них внедрены в производство.

Разработаны новые конструкции узла влагозащиты тонкопленочных конденсаторов и новая конструкция закрепления выводов электролитических конденсаторов, позволившие существенно повысить их надежность и долговечность.

Путем расчета и экспериментов установлено, что причиной растрескивания стекол фотодатчиков и гермовыводов является неблагоприятное сочетание значений физико-механических характеристик ковары и стекла, микродефектов поверхности стекла и значительных градиентов температуры по радиусу при стеклоспае. Для повышения надежности фотодатчиков созданы таблицы приемлемых сочетаний физико-механических характеристик материалов при определенных размерах микродефектов и рекомендовано для глазковых стеклоспаев отказаться от индуктивного способа стеклоспая с переходом на прогрев в муфельных печах, что и было реализовано на ряде предприятий.

Из решения множественной обратной задачи назначены допуски на значения физико-механических характеристик резисторов и конденсаторов, а также герметизирующих компаундов, при которых обеспечивается их прочность и герметичность. Из расчетов получена и экспериментально подтверждена новая, не имеющая аналогов конструкция узла герметизации изделий цилиндрической формы с выводом, содержащая компенсатор разницы в значениях физико-механических характеристик материалов при термодатировании, разработан новый тензометрический способ определения времени и степени полимеризации компаундов, позволивший в 2—10 раз сократить длительность технологического процесса для разных компаундов [11].

Результаты работы внедрены в НИИ «Гириконд», ПО «Новатор», на заводах «Гириконд», «Радар», НПО «Ленинец», «Авангард», ЦНИРТИ, НПО «Позитрон», НПО «Катион», заводе «Измеритель» и др. Экономический эффект, рассчитанный в 1989 г., от внедрения разработок по повышению статической прочности лишь на некоторых предприятиях-изготовителях составил не менее 15 миллионов рублей в год.

*По динамической прочности [12].*

Разработаны теоретические и экспериментальные методы и средства исследования вибраций и ударов в натурных изделиях электронной техники. Проведена высокоскоростная компьютерная видеосъемка колебаний типового блока РЭА, позволившая при замедленном воспроизводстве на экране монитора реально увидеть деформации и колебания печатных плат, элементов, стоек и других деталей блока на резонансных частотах возбуждения. Предложена и реализована не имеющая аналогов конструкция крепления печатных плат на тканевой подвеске с демпфером сухого трения, благодаря которой плата имеет колебания лишь в узком интервале низких частот, без

деформации самой платы, а затем, на более высоких частотах, благодаря инерционности и подвижности ткани плата остается неподвижной. Таким образом, обеспечивается сохранность навесного и печатного монтажа и обеспечивается теплоотвод и ремонтпригодность, что неразрешимо при использовании защитных компаундных покрытий. Разработаны основы теории виброизоляции печатных плат на тканевой подвеске с демпфером сухого трения.

Созданы оригинальные установки для определения формы и частоты колебаний натуральных плат с помощью пьезодатчиков, кварца и керосина. Разработана методика и доработана аппаратура для экспериментального определения деформаций и напряжений в изделиях радиоэлектроники с учетом их специфики. Разработаны методики и созданы приборы и установки для бесконтактного определения параметров вибраций натуральных изделий радиоэлектроники. Созданы оригинальные конструкции приспособлений, не имеющих резонансов в диапазонах частот 0...5000 Гц и 0...10000 Гц, для испытания радиоэлектронных изделий. Проведено вибрографирование и тензометрирование не менее 30 конструкций микромодулей и выявлено, что причиной разрушения резисторов, растрескивания компаундов, отслаивания дорожек, обрывов выводов и других дефектов является наличие резонансов в конструкциях и (или) испытательных приспособлениях, из-за чего вибрации в местах поломки в десятки и сотни раз превосходили задаваемые и допустимые.

Разработаны методы и средства повышения вибрационной и ударной прочности конструкций изделий радиоэлектроники.

Созданы не имеющие аналогов конструкции изделий радиоэлектроники и приспособлений, которые либо не имеют резонансов в диапазоне рабочих частот, либо меняют свои упругодемпферные характеристики при подходе к резонансу и восстанавливают эти характеристики после прохода резонансов (безрезонансные приспособления, пневматическая подвеска и подвеска блока с демпфером сухого трения).

Разработана методика испытаний изделий, чей вес превышает технические возможности вибростендов. Создана методика определения параметров ударного импульса и тарировки ударных стендов. Создана и внедрена в учебный процесс экспериментальная установка для определения формы и частоты колебаний печатных плат и других изделий, имеющих форму пластин.

Разработаны руководящие технические материалы (РТМ) по проведению вибрационных и ударных испытаний, по тарировке виброизмерительной аппаратуры, по паспортизации приспособлений для закрепления изделий, по определению центра тяжести изделий сложной конфигурации, по установке изделий на разгрузочном устройстве вибростенда. РТМ переданы предприятиям и организациям, создающим, выпускающим и эксплуатирующим радиоэлектронную аппаратуру.

*По неразрушающим методам контроля, диагностированию и прогнозированию прочности [13].*

Создана лаборатория акустической эмиссии (АЭ), оснащенная современными испытательными машинами и компьютерами, а также специально созданными установками и приспособлениями для испытания ИЭТ на различные виды статических, динамических, температурных воздействий и их сочетаний.

Проведена модернизация отечественных акустоэмиссионных приборов. Разработан модуль компьютерного параллельного интерфейса и пакет прикладных программ, что позволило компьютеризировать процесс сбора и обработки параметров сигналов АЭ, повысить в 40 раз количество обрабатываемых сигналов и получать трехмерную (наглядную) диаграмму распределения сигналов АЭ от времени и действующей нагрузки по координате с локацией мест излучения.

Теоретически разработаны и реализованы на практике способы плоскостной и объемной локации (пеленга) источников АЭ путем регистрации разницы времен прихода сигналов к независимым парам первичных пьезоэлектрических преобразователей, расположенных накрест, что позволяет проще и точнее, чем другими методами, определять координаты опасных дефектов плоских и пространственных деталей и конструкций.

Установлено, что метод АЭ малоэффективен для контроля качества пайки в процессе отверждения расплава легкоплавких припоев и, наоборот, высокоэффективен для контроля качества сварки в процессе остывания сварных швов. Разработана методика неразрушающего контроля качества (прочности) сварки соединенных чугуновых деталей путем анализа сигналов АЭ, которые излучаются во время остывания сварного соединения.

Разработан способ локации (пеленга) дефектов в конструкциях, имеющих сложную неоднородную поверхность, и на этой основе — методика неразрушающего контроля качества пайки печатных плат, что позволяет определять места дефектов плат.

Созданные методы и средства фиксации и компьютерной обработки сигналов АЭ позволили отработать ряд конструкций ИЭТ и технологий их производства.

Разработана и внедрена в практику исследований методология разделения сигналов АЭ, излучаемых различными материалами в неразъемных соединениях при термоциклировании ИЭТ.

Создана методика неразрушающего контроля качества керамических конденсаторов, используемых, в частности, в бортовой аппаратуре, с повышенными требованиями к механической прочности, позволяющая отбраковывать потенциально ненадежные конденсаторы. Научно обоснована возможность индивидуального прогнозирования прочности керамических конденсаторов. Разработаны способы прогнозирования пределов прочности, реализация которых основана на регистрации параметров акустической эмиссии в процессе разгрузки, сопровождающейся развитием локальных дефектов без зарождения микротрещин. Один из способов эффективен для конденсаторов, имеющих технологические дефекты, а другой — для конденсаторов, разрушение которых обусловлено зарождением в них магистральной трещины.

Предложен неразрушающий метод контроля герметичности корпусов микросборок СВЧ в условиях эксплуатации, т. е. на борту летательных аппаратов, когда в результате взлетов и посадок корпуса испытывают перепады давления и возникает опасность разрушения сварного шва и разгерметизации корпуса. Зафиксированные прибором АЭ сигналы, амплитудный уровень которых превышает допустимый, свидетельствуют (предупреждают) о начавшемся процессе разрушения и о том, что за 6—8 циклов (т. е. взлетов и посадок) произойдет разгерметизация корпуса. Спроектирован и создан портативный акустоэмиссионный прибор, предназначенный для предупреждения о начале процесса разгерметизации корпусов микросборок СВЧ и контроля качества их сварных швов на борту летательных аппаратов.

Предложен метод предупреждения опасных состояний компаундированных керамических конденсаторов, работающих в условиях термоциклирования от +60 до -50°C. Проявление акустической эмиссии на  $n$ -м цикле является предупреждением о начале процесса катастрофического разрушения конденсатора через 5—10 циклов изменения температуры.

\*\*\*

В заключение следует заметить, что работы проводились в период с 1970 по 2005 год, и некоторые объекты исследований наверняка уже морально устарели, тем не менее подходы к решению проблем их прочности и полученные результаты, безусловно, представляют интерес не только в историческом плане. Они могут быть перенесены на современные изделия РЭА и использованы разработчиками и изготовителями изделий для ликвидации дефектов и повышения прочностной надежности изделий радиоэлектронной аппаратуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Трифанюк В. В. Надійність пристроїв промислової електроніки.— К.: Либідь, 1992.
2. Карпушин В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре.— М.: Сов. радио, 1971.
3. Маликов И. М., Половко А. М., Романов Н. А., Чукреев П. Л. Основы теории и расчета надежности.— Л.: Судпромгиз, 1960.
4. Держинский С. М., Рыжанков В. И. Модель формирования испытаний РЭА на воздействие широкополосной случайной вибрации//Механика радиоэлектронных и вычислительных устройств (Таганрог. радиотехн. ин-т).— 1982.— Вып. 2.— С. 61—66.
5. Кофанов Ю. Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств.— М.: Радио и связь, 1991.
6. Шмидт Э. П. Натурные испытания электронных приборов.— М.: Сов. радио, 1976.
7. Малинский В. Д. Контроль и испытание радиоаппаратуры.— М.: Энергия, 1970.
8. Кузнецов О. А., Логинов А. Н., Сергеев В. С. Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры.— М.: Радио и связь, 1990.
9. Royzman V. P. Residual stresses in compounding electronic systems / Proceedings of the Fourth International Conf. on Residual Stresses.— Baltimore, Maryland, USA.— 1994.— P. 814—820.
10. Royzman V. P., Nester N. A. Problem of mechanical strength in electronics / Power Electronics and Applications. 7th European Conf.— Trondheim, Norway Voll.— 1997.— P. 1396—1399.
11. Royzman V. P., Lebed A. V. Theoretical and experimental analysis the humidity protective units of electrolytic and thin-film capacitors / Proceedings of PCIM 2001 Conf.— Nuremberg, Germany.— 2001.— P. 382—387.
12. Royzman V. P., Nester N. A. Vibration isolation of wiring boards in products of electronics / Proceedings of the 15th Intern. Modal Analysis Conf.— Orlando, Florida, USA.— 1997.— P. 1838—1844.
13. Royzman V. P. Computation and experimental mechanics electronics / Fifth World Congress on Computation Mechanics. Vol. 1.— Viena, Austria.— 2002.— P. 300—301.

К. т. н. И. В. ИВАНОВА

Россия, г. С.-Петербург, Северо-Западный гос. заочный технический университет  
E-mail: rilala\_spb@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
20.05 2005 г.

Оппонент к. т. н. И. А. КИРЕЕВ  
(ОНАС им. А. С. Попова, г. Одесса)

## АЛГОРИТМ ГИБРИДНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ КОДОВ РИДА—СОЛОМОНА БЕЗ РЕКУРРЕНТНЫХ ПРОЦЕДУР

*На основе вычисления особых продолжений ганкелевых (теплицевых) матриц и синдромов существенно снижается погрешность ошибок при канальном декодировании.*

В рамках задачи обеспечения достаточной помехоустойчивости в системах передачи информации в работах [1, 2] сделан вывод о необходимости разработки безрекуррентных процедур декодирования применительно к кодам Рида—Соломона, представляющих наибольший практический интерес. Разработка

таких процедур декодирования возможна с использованием ганкелевых (теплицевых) матриц при вычислении синдромов ошибок.

В теории помехоустойчивого кодирования операции с ганкелевыми (или теплицевыми) матрицами осуществляется при составлении системы линейных уравнений, называемых синдромными и записываемых в векторно-матричной форме в виде  $A_T \sigma = b$ ;  $A_T \bar{\sigma} = b$ , где  $A_T, A_T$  — квадратные матрицы порядка  $n$ , соответственно теплицева и ганкелева;  $\sigma = [\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_n]^t$  — вектор-столбец высоты  $n$  неизвестных переменных;  $b = [b_1 b_2 \dots b_n]^t$  — вектор-столбец высоты  $n$  известных

величин (параметров), причем вектор  $b$  является продолжением матрицы  $A$ , т. е.  $b^t = (a_{n+1} a_{n+2} \dots a_{2n})$ ;  $\bar{\sigma}$  — обращенный вектор  $\sigma$ .

Матрица  $A$  полностью определена набором коэффициентов  $A = (a_1 a_2 \dots a_{2n})$ . Задача состоит в нахождении особых продолжений матриц  $A_{n,n+1}$ ,  $A_{n,n}$ , не изменяющих ранг матрицы  $A_{n,n}$ . Отыскание особого продолжения ганкелевой матрицы сводится к нахождению полинома

$$\sigma(z) = z^r + \sigma_1 z^{r-1} + \sigma_2 z^{r-2} + \dots + \sigma_{r-1} z + \sigma_r,$$

где  $r$  — ранг матрицы  $A_{n,n+1}$ .

Известно [3, 4], что если квадратная матрица  $A$  особенная, то она имеет единственное особое продолжение, а если неособенная — то бесконечное множество особых продолжений. Что касается расширенной прямоугольной матрицы  $A_{n,n+1}$ , то нетрудно показать, что она всегда имеет единственное продолжение. Для нахождения особых продолжений ганкелевой матрицы нет необходимости продолжать ее вправо, достаточно рассмотреть матричную ленту, т. е. продолжения вниз и вверх.

Для конечных полей  $GF(p^r)$  продолжения и вверх, и вниз, очевидно, не бесконечны, и лента как бы замыкается, т. е. продолженный вектор  $A$  периодичен. Более того, если период строго равен  $N=p^r$ , т. е.  $e_{N-1} = e_{-1}$ ,  $e_N = e_0$ ,  $e_{N+1} = a_1$  и т. д., то декодирование осуществлено верно (число ошибок менее  $n$ ). В общем случае может быть использован следующий обобщенный алгоритм вычисления продолжения матрицы  $A_{n,n+1}$  [5].

1. Находится полином (в теории помехоустойчивого кодирования полином  $\sigma(z)$  принято называть полиномом локаторов [6])

$$\sigma(z) = \sigma_0 z^n + \sigma_1 z^{n-1} + \dots + \sigma_{n-1} z + \sigma_n,$$

в матрично-определяющей форме имеющий вид

$$\sigma(z) = \begin{pmatrix} \sigma_n & \sigma_{n-1} & \sigma_{n-2} & \dots & \sigma_1 & \sigma_0 \\ 1 & z & z^2 & \dots & z^{n-1} & z^n \\ a_1 & a_2 & a_3 & \dots & a_n & a_{n+1} \\ a_2 & a_3 & a_4 & \dots & a_{n+1} & a_{n+2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n & a_{n+1} & a_{n+2} & \dots & a_{2n-1} & a_{2n} \end{pmatrix} \cdot \quad (1)$$

2. Вычисляются продолжения  $a_{2n+i}$ ,  $i=1, 2, \dots$ , т. е. "продолжения вниз", и  $a_{-i}$ ,  $i=0, 1, 2, \dots$ , т. е. "продолжения вверх", по рекуррентной формуле

$$\sum_{k=0}^{j-n} a_{j-k} \sigma_k = a_j \sigma_0 + a_{j-1} \sigma_1 + \dots + a_{j-n} \sigma_n = 0, \quad (2)$$

$j > 2n$  ("продолжения вниз"),  $j < n+1$  ("продолжения вверх").

Соотношение (2), конечно, справедливо и при  $n+1 \leq j \leq 2n$ , но в этом случае оно связывает только известные коэффициенты  $a_1, a_2, \dots, a_{2n}$ . Отметим также, что в формуле (2) и известные коэффициенты  $a_i$ ,  $i=1, 2, \dots, 2n$ , и неизвестные коэффициенты при  $i \leq 0$ ,  $i > 2n$  обозначены одними и теми же символами  $a$  с индексами.

Для нахождения  $\sigma(z)$  могут использоваться следующие методы:

— прямой метод вычисления определителя матрицы  $A_{n,n+1}$  [7];

— метод Берлекэмпа–Мессис [5, 6];

— алгоритм Евклида вычисления наибольшего общего делителя (НОД) полиномов  $z^m$  и  $A(z)$  по mod  $z^m$  либо  $z^m - 1$  и  $A(z)$  по mod  $z^m$ , где  $m=2n$ , [5]:

$$A(z) = \sum_{i=1}^{i=2n} a_i z^{2n-i}.$$

Алгоритм прерывается в момент, когда степень очередного остатка  $R$  станет менее  $n/2$  (такой остаток по аналогии с [8] будем называть полу-НОД). В этом случае  $\sigma(z)$  находится как рекуррентная последовательность из частных от деления на каждом шаге алгоритма Евклида [5].

В настоящей статье показано, что особые продолжения расширенных ганкелевых и теплицевых матриц (прямоугольных форм) могут быть найдены без рекуррентных процедур.

Будем считать, что количество ошибок не превышает величины  $n$ , то есть полином  $\sigma(z)$  имеет над полем  $GF(p^r)$  не более  $n$  корней, причем все они простые.

Рассмотрим произведение

$$A(z) \cdot \sigma(z) = (a_1 z^{2n-1} + a_2 z^{2n-2} + \dots + a_{2n-2} z^2 + a_{2n-1} z + a_{2n}) \times (\sigma_0 z^n + \sigma_1 z^{n-1} + \dots + \sigma_{n-2} z^2 + \sigma_{n-1} z + \sigma_n) = \sum_{i=1}^{i=2n} a_i z^{2n-i} \cdot \sum_{i=0}^{i=n} \sigma_i z^{n-i}.$$

Его можно разбить на три части:

$$A(z) \cdot \sigma(z) = P(z) + Q(z) + R(z),$$

где  $P(z)$  — сумма старших членов;

$Q(z)$  — средняя часть;

$R(z)$  — сумма младших членов (остаток).

Ясно, что средняя часть  $Q(z)$  в произведении  $A(z) \cdot \sigma(z)$  в силу соотношения (2) равна нулю. Остаток  $R(z)$  является полу-НОД полиномов  $z^{2n}$  и  $A(z)$ . Полином  $\sigma(z)$  может быть вычислен непосредственно по  $R(z)$  и  $A(z)$  на основании соотношения

$$\bar{\sigma} = \bar{R} z^{2n} \div \bar{A}, \quad (3)$$

где  $\bar{S}$  как  $\bar{b}$  обращен — прочитывается с конца по отношению к вектору  $S$ .

Обращенный вектор  $\bar{P}$  для суммы старших членов можно рассматривать как "остаток", точнее — полу-НОД полиномов  $z^{2n}$  и  $A(z)$ , и использовать следующее соотношение:

$$\sigma = P z^{2n} \div A. \quad (4)$$

Покажем теперь, как можно вычислить продолжения  $A(z)$  без привлечения рекуррентных процедур.

"Продолжения вниз"  $A \downarrow$  для  $A(z)$  можно найти из соотношения

$$A \downarrow = -R \div \sigma = -R \div (P \div A). \quad (5)$$

Аналогично, "продолжения вверх"  $A \uparrow$  для  $A(z)$  можно найти из соотношения

$$A \uparrow = -\bar{R} \div \bar{\sigma} = -\bar{P} \div (\bar{R} \div \bar{A}). \quad (6)$$

Заметим, что если по условию задачи требуется отыскание небольшого числа компонент продолжений (не более  $2n$ ), то можно также использовать следующие соотношения:

$$A \downarrow = (-RA) \div P = (-R \div P)A;$$

$$A \uparrow = (-\bar{P}\bar{A}) \div \bar{R} = (-\bar{P} \div \bar{R})\bar{A},$$

в то время как по формулам (5), (6) можно вычислять любое число продолжений.

Как уже отмечалось, если полином  $\sigma(z)$  имеет только простые корни над полем  $GF(p^r)$ , то период продолжений равен  $N=p^r$ . С другой стороны, равенство периода величине  $N$  может использоваться для проверки результата вычислений продолжения вектора в процессе декодирования кода Рида–Соломона (РС):  $N$  значений полного вектора  $A$  определяют спектр конфигурации ошибок. Для нахождения полинома ошибок достаточно вычислить обратное преобразование Фурье от полного вектора  $A$  [5].

Итак, соотношения (3) или (4) позволяют безрекуррентно вычислить полином  $\sigma(z)$ , а соотношения (5) или (6) — найти продолжения вектора  $A$  соответственно вниз или вверх. Естественно, деление практически выполняется по процедурам, не требующим нахождения обратных элементов [8].

**К**одирование в частотной области РС-кодами над полем  $GF(q=2^r)$  состоит в следующем.

Информационное сообщение  $Q$  из  $k=n-m=q-1-m$  символов принимается в качестве старших компонент спектра  $V$ , а остальные  $m$  символов этого спектра полагаются равными нулю.

Кодовое слово  $V$  в несистематической форме (передаваемое в канал) получается за счет обратного  $n$ -точечного преобразования Фурье–Мэттсона–Соломона (ФМСП) спектра  $V$  длины  $n$ . Это преобразование может выполняться по быстрым алгоритмам.

Укрупненный алгоритм декодирования РС-кода в частотной области состоит из следующих основных этапов:

1. ФМС-преобразование.
2. Нахождение полинома локаторов.
3. Рекуррентное продолжение синдрома.
4. Коррекция.

На первом этапе принятое кодовое слово  $V$  (возможно, искаженное помехами) подвергается  $n$ -точечному ФМС-преобразованию. Полученный вектор  $C=(C_0, C_1, \dots, C_{n-1})$  соответствует спектру для суммы кодового слова  $V$  и ошибки  $e$ , т. е.  $C=(V+e)\Phi_n=V+E$ .

Так как  $m$  составляющих  $\rho_i$  вектора  $V=(Q; \rho)$  являются нулевыми, то соответствующие им  $m$  компонент вектора  $S=(S_0=C_k, S_1=C_{k+1}, \dots, S_{m-1}=C_{n-1})$  "в чистом виде" характеризуют конфигурацию ошибок  $e$ . Другими словами, эти  $m$  компонент аналогичны синдрому во временной области; причем если все они равны нулю, то считается, что в принятом слове  $V$  нет ошибок (иначе  $V$  обязательно искажено).

Второй этап упрощается (по сравнению с временным декодированием), т. к. отпадает надобность в полном решении ключевого уравнения, а достаточно найти лишь полином локаторов  $\sigma(z)$ . Поэтому сокращается количество операций при решении уравнения с помощью метода Тренча–Берлекэмп–Мессе (ТБМ), алгоритма Евклида или другого приема.

Например, для вычисления полинома  $\sigma(z)$  воспользуемся следующим методом: построим на  $m$ -компонентном векторе синдрома  $S$  усеченную побочно-диагональную ганкелеву матрицу типа

$$\Lambda = \begin{bmatrix} S'_1 & S'_2 & \dots & S'_g \\ S'_2 & S'_3 & \dots & S'_{g+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S'_g & S'_{g+1} & \dots & S'_{2g} \end{bmatrix},$$

где  $S'_{j+1} \equiv \sum_{i=0}^{i=h} (-1)^i \sigma_i \cdot S_{h+j+1-i}, \quad j = 0, 1, 2, \dots,$

которую методом Гаусса приведем к трапециевидному виду. Тогда в ее последней строке будет сформирован остаток  $R$ , т. е. полу-НОД  $[z^m, S(z)]$ .

Далее используем безрекуррентную процедуру, основанную на соотношении типа (3), которое в нашем случае удобно представить в следующей форме:

$$\bar{R} z^m \div \bar{S}' = \bar{\sigma} = \sigma_v \bar{\Psi}, \quad (7)$$

где  $\bar{S}'$  — нормализованный синдром, получаемый из вектора  $\bar{S}$  при умножении всех компонент последнего на  $S_n^{-1}$  ( $S_n$  — его самый левый ненулевой коэффициент);

$\sigma_v$  — старший коэффициент полинома  $\sigma(z)$ ;

$\bar{\Psi}$  — нормализованный вектор, полученный из вектора  $\sigma$  при умножении компонент последнего на  $\sigma_v^{-1}$ .

Третий этап сводится к вычислению спектра  $E$  ошибок. Для этого осуществляется рекуррентное продолжение синдрома, или, что то же самое, — особое продолжение ганкелевой матрицы, построенной на  $m$ -разрядном векторе синдрома. Подробно приемы вычисления указанных продолжений были рассмотрены выше. Заметим, что, вообще говоря, достаточно найти  $k$  составляющих продолжения. Однако для косвенной проверки правильности вычисления полинома  $\sigma(z)$  вектора  $E$  целесообразно найти еще  $m$  продолжений последнего, которые должны совпасть с  $m$  компонентами синдрома.

Продолжения синдрома находятся на основании соотношения типа (2). Однако в нашем случае вычисления удобно производить по следующей рекуррентной формуле:

$$E_{n-1-v-j} \Psi_v = E_{n-v-j} \Psi_{v-1} + \dots + E_{n-2-j} \Psi_1 + E_{n-1-j} \Psi_0, \quad GF(2^r), \quad (8)$$

где  $\Psi_v=1, j=0, 1, \dots, n-v; v$  — степень полинома  $\sigma(z)$ , т. е. число ошибок, исказивших принятое кодовое слово.

При этом  $m$  старших составляющих спектра  $E$  совпадают с соответствующими компонентами синдрома, характеризующими "чистую" ошибку  $e$ , а именно,  $E_{n-1}=S_{m-1}, E_{n-2}=S_{m-2}, \dots, E_{k=n-m}=S_0$ .

Коррекция (четвертый этап) состоит в сложении векторов  $C, E$  и выделении сообщения  $Q$  после отбрасывания нулевого вектора длины  $m$  из суммы  $V=C+E=(Q; \rho)$ .

Частотный метод декодирования значительно проще декодирования во временной области. Однако он имеет следующий недостаток: сбои в блоке ФМС-преобразования, искажающие любые "несиндромные" символы  $C_i$  с номерами  $i=0, 1, \dots, k-1$ , не могут быть выявлены.

Действительно, пусть для простоты принято неискаженное кодовое слово  $V' = V$  с нулевыми  $m$  правыми разрядами. Но если в процессе ФМСП будут искажены символы  $C_i$  с номерами  $i=0, 1, \dots, k-1$ , то аналогично будет искажено сообщение  $Q$  на выходе декодера, хотя  $m$  проверочных компонент вектора  $C$ , т. е. синдром, и равны нулю.

Систематическое кодирование РС-кодом во временной области с помощью симметричного порождающего полинома  $\sigma(z)$  при  $v=0$  (или  $v=1$ ) можно упростить (снизить число умножений на разные константы), если, принимая  $v=2^{r-1}-0,5m$ , составить порождающий полином в следующей симметричной форме:

$$g(z) = g_m z^m + g_{m-1} z^{m-1} + \dots + g_1 z + g_0, \quad (9)$$

где  $g_{m-i} = g_i, i = 0, 1, \dots, 0,5m-1; g_0 = g_m = 1$ .

В остальном процедура систематического кодирования не изменяется: находится остаток

$$R = \text{rest} [z^m Q(z) \div g(z)]$$

и составляется кодовое слово вида

$$V(z) = z^m Q(z) + R(z).$$

Пусть код РС над полем  $GF(2^2)$  имеет длину  $2^r-1=n=n_1 n_2$ , а число  $m$  проверочных символов равно  $n-k$ . Тогда  $S = Hx' = A_m D_n^{(2)} (\Phi_{n_2} \otimes E_{n_1}) x'$ , где матрица  $A_m$  получается из матрицы  $A = (\Phi_{n_2} \otimes E_{n_1})$  выбором  $m$  строк с номерами  $v = n_i i \pmod{n-1}, i = 0, 1, \dots, m-1$ .

В общем случае, если  $n=n_1 n_2 \dots n_r$ , то

$$S = Hx' = A_m \prod_{i=2}^r D_n^{(i)} \Phi_n^{(i)},$$

где  $A_m$  — матрица размера  $n \times m$ , образованная первыми  $m$  строками матрицы

$$P_n' F_n^{(1)} = P_n' (E_{M_i} \otimes \Phi_{n_i}), M_i = n_2 n_3 \dots n_r;$$

$P_n'$  — матрица рядно-инверсных перестановок, строки и столбцы которой нумеруются числами  $N$  и  $\bar{N}$ :

$$N = \sum_{i=0}^{\mu-1} (n_0 n_1 \dots n_i) N_i, N_i = 0, 1, \dots, n_{i+1} - 1;$$

$$\bar{N} = \sum_{i=0}^{\mu-1} (n_{\mu+1} n_{\mu} \dots n_{\mu+1-i}) N_{\mu-1-i},$$

а матрицы  $D_n^{(i)}$  и  $\Phi_n^{(i)}$  определяются как

$$D_n^{(i)} = E_{M_i} \otimes D_{n_i n_i}$$

и

$$\Phi_n^{(i)} = E_{M_i} \otimes \Phi_{n_i} \otimes E_{N_i},$$

где  $M_i = n_{i+1} n_{i+2} \dots n_{r+1}; N_i = n_0 n_1 \dots n_{i-1}; n_0 = n_{r+1} \equiv 1; D_n^{(i)} \equiv E_{n_i}$ .

Укрупненный алгоритм гибридного декодирования РС-кода состоит из следующих этапов:

1. Вычисление  $m$ -точечного ФМС-преобразования.
2. Нахождение полинома локаторов.
3. Рекуррентное продолжение синдрома.
4. Обратное ФМС-преобразование.
5. Коррекция.

Первый этап фактически сводится к вычислению синдрома и аналогичен первому этапу временного декодирования. Специфика ФМС-преобразования проявляется лишь при реализации быстрых алгоритмов, подобных рассматриваемым выше.

Второй и третий этапы идентичны соответствующим этапам частотного декодирования. Продолжение вектора синдрома  $S$  совпадает с особым продолжением ганкелевой матрицы. Подобные продолжения матриц над бесконечным полем могут быть найдены различными способами, в частности, с использованием алгоритмов Гаусса, Евклида и итеративного ТБМ-метода. Для конечных полей все эти приемы также справедливы.

Обратное ФМС-преобразование на четвертом этапе выполняется по быстрым алгоритмам и не отличается от последнего этапа кодирования в частотной области. Отличие состоит лишь в том, что в процессе декодирования находится вектор  $e$ , большинство (от  $n$  до  $n-0,5m$ ) составляющих которого равны нулю.

Завершается декодирование коррекцией, сводящейся к суммированию принятого слова  $V$  вектором ошибки  $e$ .

\*\*\*

Итак, можно констатировать следующее: гибридный метод декодирования проще временного, но сложнее частотного. Зато в гибридном случае (в отличие от частотного) вероятность ложного декодирования значительно ниже, чем при частотном методе, при котором правильность ФМС-преобразования не контролируется (точнее, требует существенных дополнительных затрат для контроля).

Разработанные алгоритмы декодирования кодов Рида-Соломона над полем Галуа  $GF(2^r)$  на основе вычисления особых продолжений ганкелевых (теплицевых) матриц и синдромов позволяют снизить погрешность ошибок при канальном декодировании в  $2^{(m+1)(R-r)}$  раза.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Иванова И. В. Классификация и синтез полиномиальных кодеров в системах автоматизированной обработки данных // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 4.— С. 19—23.
2. Иванова И. В. Анализ методов синдромного декодирования кодов Рида-Соломона // Там же.— 2005.— № 5.— С. 7—9.
3. Иохвидов И. С. Ганкелевы и теплицевы матрицы и формы.— М.: Наука, 1974.
4. Воеводин В. В., Тьртышников Е. Е. Вычислительные процессы с теплицевыми матрицами.— М.: Наука, 1987.
5. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролируемых ошибок.— М.: Мир, 1986.
6. Берлекэмп Э. Алгебраическая теория кодирования.— М.: Мир, 1971.
7. Бабанин А. Г., Бессонов М. В., Добрынин В. Ю., Клюев В. В. Анализ определительного метода декодирования кода Рида-Соломона // Электронное моделирование.— 1984.— Т. 6, № 3.— С. 41—45.
8. Ахо А., Хопкрофт Д., Ульман Д. Построение и анализ вычислительных алгоритмов.— М.: Мир, 1979.

К. т. н. Г. И. ГАВРИЛЮК, Т. В. МАЕВСКАЯ,  
В. В. ЧЕЧЕЛЬ, Н. Н. ШАРАН

Украина, г. Винница, НИИ "Гелий", НИЦ РЭ "Полкус"  
E-mail: c\_polus@svitonline.com

Дата поступления в редакцию  
25.05 2005 г.

Оппонент д. т. н. А. Ф. КАДАЦКИЙ  
(ОНАС им. А. С. Попова, г. Одесса)

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОЩНЫМИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ МОП-ИНВЕРТОРАМИ, ИСКЛЮЧАЮЩАЯ ТИРИСТОРНЫЙ ЭФФЕКТ

*Предлагаемый подход в конструировании мощных инверторов напряжения повышает надежность их работы, расширяя при этом пределы питающих напряжений и частоты преобразования.*

В настоящей работе представлена разработанная универсальная функционально завершенная схема управления мощными силовыми приборами в устройствах вторичного преобразования электрической энергии. Как известно, такие преобразователи включают в себя модуль управления (драйвера) и силовые ключи, выполненные на базе МОП-транзисторов.

На рис. 1 представлены разновидности схем включения мощных транзисторов импульсных преобразователей, где  $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$ ,  $I_{c3}$ ,  $I_{c4}$  — ток стока

соответствующего транзистора;  $U_{g1}$ ,  $U_{g2}$ ,  $U_{g3}$ ,  $U_{g4}$  — напряжение на затворе, соответственно;  $U_{п1}$  — напряжение питания инвертора ( $U_{п1} = U_{п2}$ );  $I_{c\max}$  — максимальное значение коммутируемого тока.

Как видно из рисунка, затворы транзисторов VT1 и VT2, VT3 и VT4 в режиме переключения потенциально удаляются друг от друга в пределах от 0 до  $+U_{п1}$ . Поэтому такие устройства отличаются повышенными требованиями к фиксации рабочих режимов каждого из транзисторов.

Использование МОП-транзисторов в качестве силовых ключей значительно упростило выполнение этих условий, а использование в качестве схем управления твердотельных драйверов, например IR2151 фирмы International Rectifier, позволило создавать простые и дешевые вторичные источники электропитания, работающие на частотах преобразования  $< 100$  кГц, мощностью преобразования  $< 1$  кВт и рабочем напряжении  $< 600$  В. Однако с ростом частоты переключения и коммутируемых мощностей в драйвере затвора может выделяться чрезмерная мощность рассеяния. Это связано с тем, что емкость Миллера "затвор—сток" силовых транзисторов подпитывает заряд затвора, увеличивая его потенциал. Высота и ширина "толчка" напряжения на затворе определяется отношением емкостей "затвор—сток" и "затвор—исток", выходным импедансом схемы управления затвором и приложенным  $dv/dt$  (скорость изменения электрического потенциала) между стоковым и истоковым выводами [1, с. 14].

Обычно, повышая безопасность режимов работы транзистора, т. е. уменьшая влияние емкости, понижают выходной импеданс схемы управления. С другой стороны, добиваясь надежной устойчивой работы драйвера, устанавливают в цепи затвора ограничительный резистор  $R_{огр}$  (см. рис. 2). Как видно, эти мероприятия взаимно противоречивы; выбранный

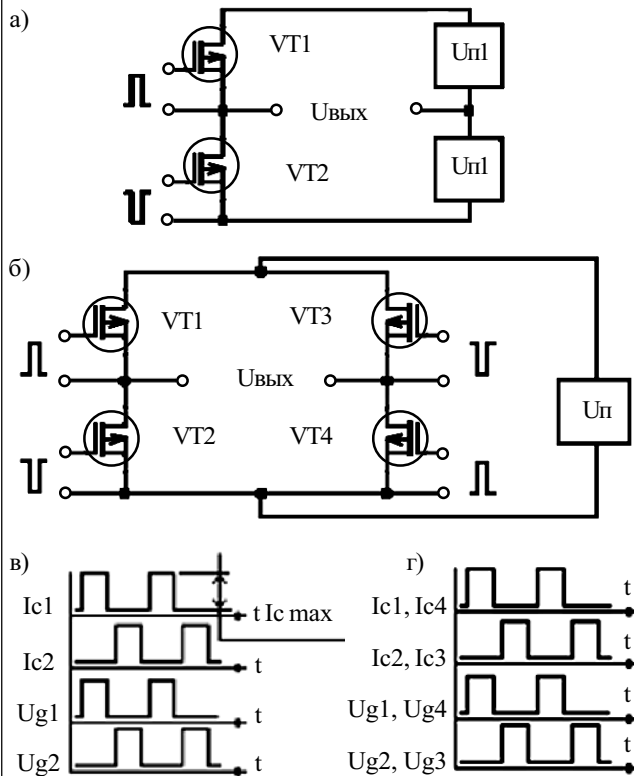


Рис. 1. Силовой каскад полумостового (а, в) и мостового (б, г) инвертора:

а, б — схемы принципиальные электрические; в, г — временные диаграммы токов и напряжений

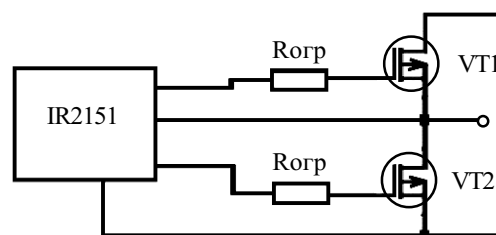


Рис. 2. Ограничение заряда Миллера на выходные цепи драйвера

компромисс не способствует повышению частоты коммутации.

В последние годы наблюдается тенденция к увеличению удельной мощности преобразования на единицу массы или объема. При этом требования к надежности работы преобразователя не только не снижаются, но и порой повышаются. Чтобы увеличивать удельную мощность преобразователя, необходимо увеличивать частоту преобразования.

Так как силовые МОП-транзисторы способны работать на частотах  $>100$  кГц, проанализируем причины ограничения частоты переключения в мощных инверторах. При коммутации больших токов применяются силовые транзисторы, входная емкость которых превышает десятки, а порой и сотни нанофард. Динамическое сопротивление выходного каскада драйвера, по приближенным расчетам, должно быть в таких случаях  $<100$  мОм. Если устанавливать резистор в цепи затвора согласно рис. 2, будут происходить большие потери активной мощности управляющего сигнала и — самое неприемлемое — будет увеличиваться длительность фронтов.

В твердотельном исполнении добиться требуемого импеданса не сложно. Для этого увеличивают размеры выходных транзисторов, предусмотрев возможность последующего отвода тепла от них. Однако, на наш взгляд, тиристорный эффект, вероятность проявления которого увеличивается с ростом частоты напряжения и температуры, полностью устранить практически невозможно, т. к. в случае без резистора весь возвратный заряд от паразитной емкости с затвора поступает на драйвер.

Рассмотрим классический пример твердотельной схемы управления инвертором IR2151.

На рис. 3 представлена в эскизе широко распространенная [1, 2] блок-схема драйвера. Не вникая здесь в сущность работы драйвера, т. к. она безупречна, можно выделить только следующее: схема управления транзистором верхнего уровня и схема управления транзистором нижнего уровня конструктивно разделены обратносмещенным переходом, а функциональная связь между каналами выполняется с помощью по крайней мере (как пишут в [1]) двух высоковольтных МОП-транзисторов. По электрическим параметрам потенциально они находятся в той же системе координат, что и силовые. Этим транзисторам также присущ эффект емкости Миллера, которая способствует разогреву их микрообластей. В определенных случа-

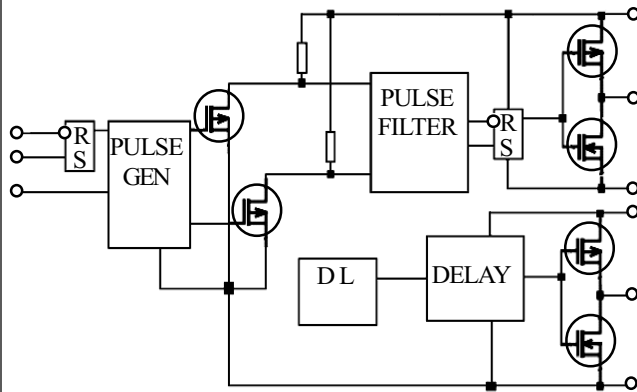


Рис. 3. Блок-схема драйвера IR2151

ях мгновенно повышается их температура, которая снижает пороговые напряжения. В свою очередь такое снижение порога увеличивает сквозные неуправляемые токи, особенно при предельных питающих напряжениях инвертора. Транзисторы в кристалле продолжают разогреваться еще с большей скоростью, т. е. процесс происходит мгновенно, лавинно и необратимо, с катастрофическим завершением — кристалл при этом разрушается, разделяясь на две части.

Помимо этого события, вследствие большого "впрыскивания" заряда в режиме короткого импульса может также произойти сбой фазового генератора микросхемы, когда (совершенно однозначно!) одновременно откроются верхний и нижний транзисторы инвертора. В этом случае драйвер остается невредимым, а у силовых транзисторов наступает токовый пробой канала.

На наш взгляд, сохраняя все функциональные достоинства этой блок-схемы, необходимо отказаться от способа передачи сигналов управления из схемы нижнего уровня в схему верхнего с помощью высоковольтных транзисторов. Мы предлагаем вариант драйвера, выполненного аналогично изображенному на рис. 3, со следующей принципиальной разницей: *вместо двух полевых транзисторов применить высокочастотный трансформатор*, размеры которого ничтожно малы, а диэлектрические свойства намного превосходят обратносмещенные переходы твердотельных структур.

Рассмотрим изображенную на рис. 4 функциональную схему предлагаемого модуля управления (МУ).

Генератор 1 вырабатывает импульсы с частотой  $2F$  коммутации в автоматическом режиме и ждущем режиме по входу 2. С выхода генератора 1 импульсы поступают на вход генератора фаз 5, на выходе которого формируется двухканальная последовательность. Для канала нижнего уровня сигналы сразу поступают на буферный усилитель 11, а для канала высокого уровня — на вход модулятора 3, 4. На второй вход этого модулятора поступает высокая частота от генератора 2. Нагрузкой модулятора служит первичная обмотка разделительного трансформатора 6. С вы-

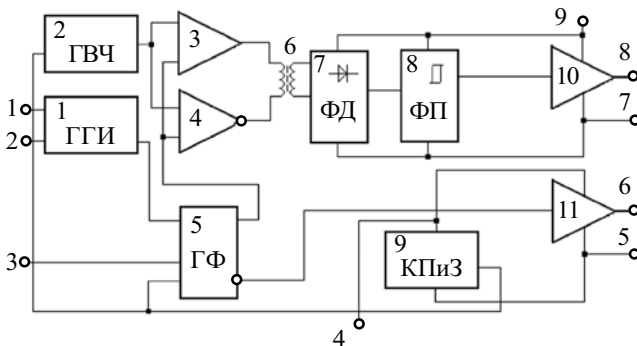


Рис. 4. Функциональная блок-схема модуля управления с трансформаторным разделением каналов верхнего и нижнего уровня:

1 — генератор тактовых импульсов (ГТИ); 2 — генератор высокой частоты (ГВЧ); 3, 4 — модулятор; 5 — генератор фаз (ГФ); 6 — разделительный трансформатор; 7 — импульсный детектор; 8 — формирователь порога; 9 — контроль питания и запуска (КПиЗ); 10, 11 — буферные усилители

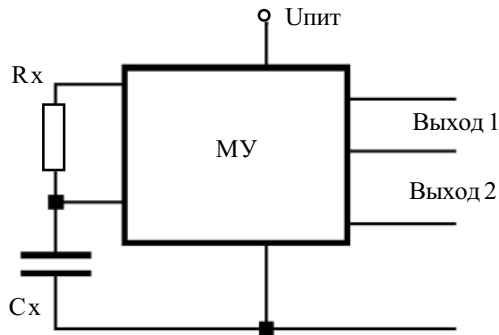


Рис. 5. Включение модуля управления в режиме автогенерации, когда  $F=(1/2)RC$

хода трансформатора сигнал поступает на импульсный детектор 7, с выхода которого — на пороговое устройство 8, после чего — на вход буферного усилителя канала верхнего уровня 10. Выход контрольного блока 9 связан с управляющими входами генераторов 1, 2, 5.

Устройство работает следующим образом.

На вход ГТИ поступают синхроимпульсы с частотой  $2F$  коммутации. Генератор 1 представляет собой функционально завершённое устройство, работающее в двух режимах генерации — "авто" или ждущем. Для авторежима необходимо подключить дополнительный конденсатор и резистор (см. рис. 5). Для работы в ждущем режиме необходимо подавать частоту  $2F$  коммутации, а амплитуда входного сигнала  $U_c$  должна быть в пределах  $0,1U_{п} < U_c < 0,9U_{п}$ .

С выхода 1 сигнал поступает на вход генератора фаз, задача которого состоит в генерировании в строго фиксированном порядке двухканальной периодической последовательности. Чтобы работа схемы управления

синхронизировалась с питанием, имеется блок 9, где находятся параметрический стабилизатор и схема управления, позволяющие стабилизировать режимы схемы на постоянном уровне и управлять работой генераторов в зависимости от напряжения питания.

При напряжении питания больше 8 В схема работает, когда же оно меньше 8 В — схемы буферных усилителей настроены так, что их выходные уровни жестко привязаны к нулевым шинам. Так же и вся логическая часть схемы управления (для помехоустойчивости) находится в устойчивом состоянии, подтверждающая эти уровни соответственно логическими сигналами. Как только напряжение питания достигает 8 В, на выходе блока 9 формируется потенциал, разрешающий блокам 1 и 2 сгенерировать начало пакета последовательности. С этого момента начинается запуск и корректная работа генератора фаз 5.

На выходе 3 генератора 5 формируется сигнал, который после усиления буферным каскадом 11 открывает силовой транзистор канала нижнего уровня. Параметры входного сигнала соответственно приведены на рис. 6, где  $T$  — период работы инвертора. Ограничение питания канала нижнего уровня в пределах 15 В осуществляется внутренней параметрической цепочкой блока питания 9. Максимальный параметрический ток, задаваемый навесным ограничительным резистором устройства, не должен превышать 30 мА. Импульсы, открывающие силовые транзисторы, могут быть укорочены до 100 нс сигналом входа 3, что дает возможность выполнять ШИМ (широтно-импульсная модуляция) регулирование в инверторе. По завершении активного уровня с выхода 3 блока 5, спустя определенное время, в процессе которого силовой транзистор нижнего канала полностью переходит в закрытое состояние, на выходе 2

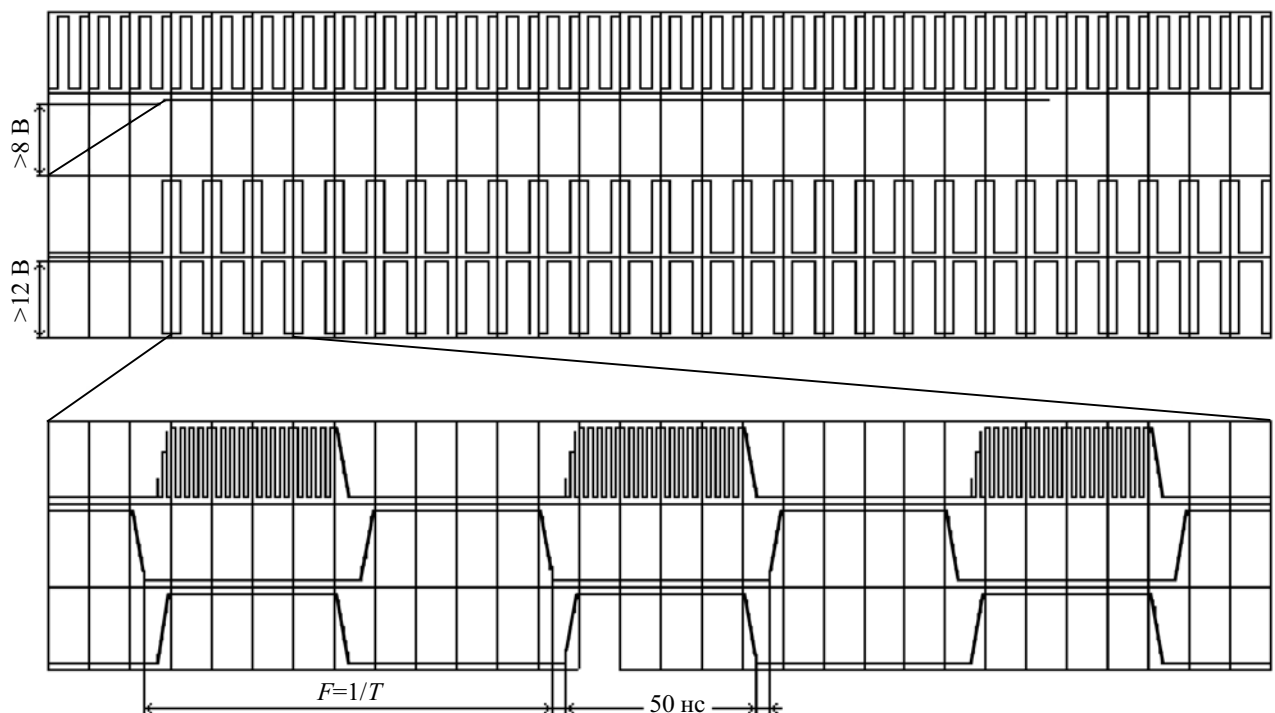


Рис. 6. Основные амплитудно-временные зависимости работы модуля управления

формируется активный логический уровень, который поступает на один из входов импульсного модулятора 3, 4. На другие входы этих блоков поступает ВЧ-сигнал, частота которого >40 МГц. Такое значение частоты способствует качественной передаче фронтов во всем рабочем диапазоне.

В блоке 3, 4 сигнал подвергается амплитудно-импульсной модуляции, после чего поступает на вход высокочастотного разделительного трансформатора 6. После гальванической развязки высокочастотный сигнал поступает на вход импульсного детектора 7. В этом же блоке полностью восстанавливается его огибающая, а в пороговом устройстве 8 формируются помехоустойчивые логические уровни, которые поступают на вход буферного усилителя силового транзистора канала верхнего уровня 10.

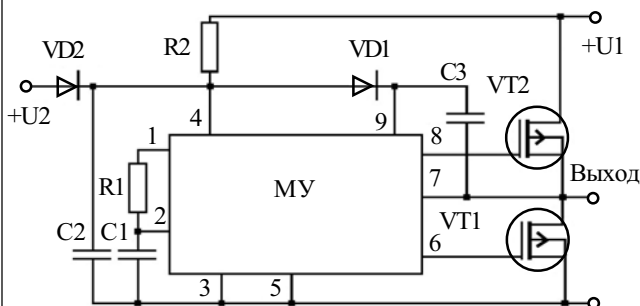


Рис. 7. Основная схема включения модуля управления

На рис. 7 приведена основная схема включения модуля управления. Как видно, его включение мало чем отличается от принятого аналога IR2151 — может быть, лишь наличием диода VD2 и вспомогательного источника питания U2, который, естественно, необходим при работах инвертора на повышенных частотах. Здесь C1 и R1 задают частоту коммутации, деленную на 2. Резистор R2 необходим для начального питания и запуска драйвера, C2 и C3 — емкости фильтров, диод VD1 предназначен для питания верхнего канала.

Работает схема следующим образом. На выходе 6 канала нижнего транзистора устанавливается уровень, который открывает VT1. Когда транзистор VT1 открыт, сток соединяется с нулевой шиной, за исключением напряжения насыщения, которое падает при прохождении через него тока. В таком случае общий провод канала верхнего уровня соединяется

с аналогичной точкой схемы канала нижнего уровня. Через диод VD1 происходит заряд емкости C3 до уровня емкости C2. По закрытии VT1 выходная точка инвертора некоторое время (50—75 нс) находится в высокоимпедансном состоянии, когда нижний транзистор уже закрыт, а верхний еще не открыт. Такой режим инвертора выбран для устранения протекания сквозного тока через его силовые транзисторы. После этого на выходе канала верхнего уровня устанавливается режим, открывающий транзистор VT2. Удержание транзистора в этом режиме осуществляется за счет энергии, запасенной в C3. Выходная точка инвертора потенциально соединена с напряжением питания U1.

По завершении фазы проводимости выход инвертора переходит в высокоимпедансное состояние с соответствующими для него временными параметрами. Такое же состояние наблюдается и в рабочем ШИМ-режиме, однако пауза сохраняется до начала очередного цикла проводимости.

Емкость, помимо фильтрующих свойств, предназначена для первоначального запуска всех режимов МУ. Ее заряда в данном случае должно хватить на 3—4 полных цикла инвертора. За это время подготавливаются другие цепочки питания, где МУ переходит на более мощный источник питания. Поэтому  $C2 \gg C3$ .

Конструктивно модуль управления выполнен на алюминиевой подложке, на которой размещена печатная плата из стеклотекстолита размерами 24×30 мм. На этой же плате размещен разделительный трансформатор, выполненный на ферритовом кольце диаметром 4 мм и содержащий две обмотки по 3 витка каждая.

\*\*\*

Таким образом, предложена универсальная схема управления мощными силовыми инверторами, где в драйвере вместо двух полевых транзисторов применен высокочастотный трансформатор. Это позволяет избежать тиристорного эффекта при повышении частоты переключений.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Силовые полупроводниковые приборы / Под ред. В. В. Токарева. — Воронеж: ЭЛИСТ, 1995.
2. Векслер Г. С., Пилинский В. В. Электропитающие устройства электроакустической и кинотехнической аппаратуры. — К.: Вища школа, 1986.

#### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

#### Денисенко А. Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника. Справочное пособие. — М.: Горячая линия-Телеком, 2005, 704 с.

В сжатой, приемлемой для инженерной и исследовательской практики форме обобщены и достаточно полно изложены методы анализа детерминированных сигналов (часть 1) и случайных сигналов и шумов (часть 2), используемые в теоретической радиотехнике. В каждом разделе теоретическая часть заканчивается расчетными выражениями и примерами расчета по ним.

Для инженеров и исследователей, работающих в области радиотехники, преподавателей, студентов старших курсов радиотехнических факультетов вузов, аспирантов.



К. т. н. В. П. ПОПОВ, Н. А. ТИМОШЕНКО, Г. А. СЛОБОДЯНЮК,  
Г. В. ЧЕРНЕЦКАЯ

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов  
E-mail: konfil@gtech-ua.com

Дата поступления в редакцию  
23.05 2005 г.

Оппонент к. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО  
(НПП "Сатурн", г. Киев)

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ МИКРОСХЕМ ШИРОКОПОЛОСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ДИАПАЗОНА 40 МГц

*Рассмотрено проектирование микросхем широкополосных усилителей с аналоговым регулированием коэффициента усиления от 0 до 40 дБ. Проведен анализ и моделирование структурной схемы.*

Микросхемы широкополосных усилителей применяются во многих видах аппаратуры радио-, гидролокации, телекоммуникации и измерительной техники. Современные достижения биполярной и КМОП-технологий позволяют получать полосу пропускания интегральных усилителей до 800 МГц и более. Конкретные значения полосы пропускания и других важных параметров, таких как уровень шумов, коэффициент усиления и динамический диапазон, определяются назначением микросхемы и уровнем применяемой технологии.

В данной работе рассматриваются проблемные вопросы проектирования микросхем широкополосных усилителей с полосой пропускания до 40 МГц и регулируемым коэффициентом усиления (variable gain amplifiers — VGA). Для реализации данного класса микросхем используют биполярную и КМОП-технологии [1, 2] и различные способы регулирования усиления.

Применение биполярной технологии позволяет получить меньший уровень шумов и полосу пропускания усилителя до 40 МГц при сравнительно умеренных требованиях к технологии, поэтому была выбрана биполярная технология с минимальной шириной эмиттера 3 мкм и разделением элементов схемы обратносмещенными  $p-n$ -переходами.

Из всех способов регулирования усиления для реализации данной микросхемы оптимальным является аналоговый метод с прецизионной регулирующей характеристикой. В качестве элемента регулирования используется R-2R-аттенуатор с переключаемыми отводами. В процессе регулирования коэффициента усиления собственно усилителя остается неизменным, а изменяется (с помощью аттенуатора) уровень сигнала на входе усилителя. Усилитель не испытывает перегрузок при изменении входного сигнала в большом диапазоне, и такие параметры как фазовая и импульсные характеристики существенно не изменяются.

Стабильность параметров усилителя при изменении питающих напряжений и температуры окружающей среды во многом зависит от выбора источника стабильного тока.

В современной микросхеме, изготавливаемой по биполярной технологии, применяют такие активные элементы как  $n-p-n$ - и  $p-n-p$ -транзисторы и пассивные элементы — пленочные резисторы и конденсаторы. В некоторых случаях, при использовании резисторов с большим сопротивлением — до 100 кОм и более, применяют пинч-резисторы с повышенным удельным сопротивлением.

В микросхеме широкополосного усилителя основным активным элементом, определяющим его частотные и шумовые характеристики, является вертикальный  $n-p-n$ -транзистор (рис. 1), расположенный в эпитаксиальном  $n$ -слое толщиной 4,5 мкм. Разделительная  $p^+$ -область образует в эпитаксиальном слое замкнутый контур (карман), в котором методами ионного легирования и диффузии создаются  $n^+$ -область эмиттера глубиной  $x_j \approx 0,6$  мкм и  $p^-$ -область базы глубиной  $x_b \approx 1,0$  мкм, формируя таким образом толщину активной  $p^-$ -базы  $n-p-n$ -транзистора  $W_0 = 0,4$  мкм. Для минимизации распределенного сопротивления базы симметрично области эмиттера формируются две низкоомные пассивные  $p^+$ -области базы. Контакт к коллектору осуществляется через диффузионные области скрытого  $n^+$ -слоя и вертикальную  $n^+$ -область глубокого коллектора. Такие топологические параметры с учетом постоянной времени эмиттера  $\tau_e = 0,05$  нс дают расчетную граничную частоту вертикального  $n-p-n$ -транзистора  $f_T = 2$  ГГц. Площадь кармана тран-

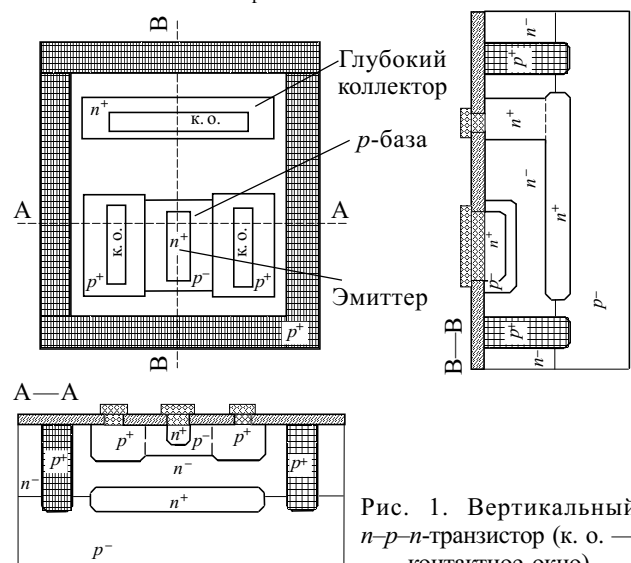


Рис. 1. Вертикальный  $n-p-n$ -транзистор (к. о. — контактное окно)

зистора с минимальными размерами эмиттера  $Y_3 = 2 \text{ мкм}$  и  $Z_3 = 5 \text{ мкм}$  равна  $57 \times 57 \text{ мкм}^2$ . В усилителе применяются также транзисторы с большей площадью и большими размерами  $Z_3$  эмиттера.

Горизонтальные  $p-n-p$ -транзисторы (рис. 2) при кольцевом эмиттере и базе шириной  $4,0 \text{ мкм}$  имеют расчетную граничную частоту  $f_T = 23 \text{ МГц}$  и более низкий коэффициент усиления тока  $\beta$  по сравнению с  $n-p-n$ -транзисторами. Они используются в узлах, где не предъявляются высокие требования к частотным свойствам, например, в источнике стабильного тока (ИСТ) и интерфейсе регулирования усиления (ИРУ). Активная  $n$ -база, образованная зазором между кольцевым  $p^+$ -эмиттером и  $p^+$ -коллектором, соединяется с выводом базы через скрытый  $n^+$ -слой и вертикальную  $n^+$ -область, формируемую в слое «глубокий коллектор».

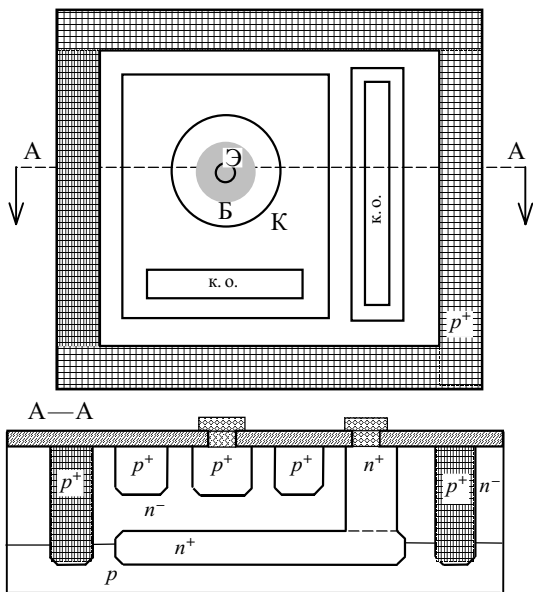


Рис. 2. Горизонтальный  $p-n-p$ -транзистор

Основными типами резисторов, используемых в микросхеме, являются пленочные резисторы с удельным поверхностным сопротивлением  $1,0 \text{ кОм}/\square$  и  $50,0 \text{ Ом}/\square$ . Оба типа резисторов выполнены из хрома, но имеют разную толщину. В узлах ИСТ и ИРУ возникает необходимость применения резисторов с сопротивлениями от  $70$  до  $190 \text{ кОм}$ , поэтому там использованы пинч-резисторы с повышенным удельным сопротивлением — до  $8 \text{ кОм}/\square$ . Пинч-резисторы образуются одновременно с изготовлением  $p$ -базы. Эмиттерная  $n^+$ -область перекрывает активную  $p^-$ -область, создавая резистивный  $p^-$ -канал  $W_6 = 0,4 \text{ мкм}$ . Для обратного смещения  $p-n$ -переходов пинч-резистора  $n^+$ -область с одной стороны и  $n^-$ -слой с другой стороны должны быть соединены с точкой максимально высокого потенциала резистора.

Конденсаторы микросхемы выполнены по структуре «металл 1—диэлектрик— $n^+$ -область». Диэлектрик является комбинацией двух слоев — нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной  $0,05 \text{ мкм}$  и окисла кремния  $\text{SiO}_2$  толщиной  $0,04 \text{ мкм}$ . Удельная емкость конденсатора равна  $5,2 \cdot 10^{-4} \text{ пФ}/\text{мкм}^2$ .

Структура микросхемы широкополосного усилителя с регулируемым коэффициентом усиления приведена на рис. 3. Восемь отводов семизвенового  $R-2R$ -аттенюатора подключены к входам восьми дифференциальных входных каскадов  $G_{m1} \dots G_{m8}$ .

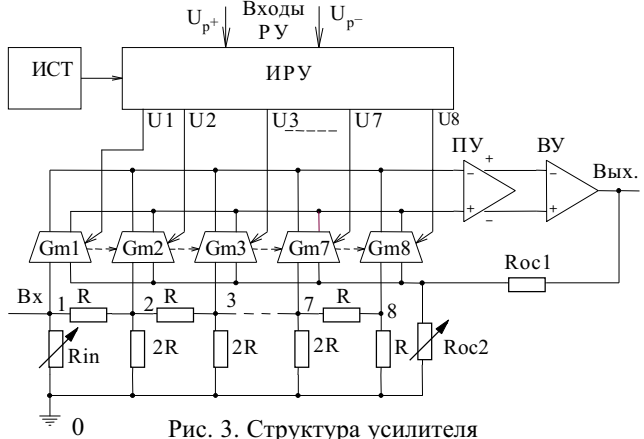


Рис. 3. Структура усилителя

Поскольку затухание входного сигнала на аттенюаторе равно  $20 \log 0,5 = -6,02 \text{ дБ}$  на одно звено, сигналы на входах  $G_{m1} \dots G_{m8}$  изменяются скачкообразно с дискретностью  $-6,02 \text{ дБ}$  от  $0 \text{ дБ}$  на входе  $G_{m1}$  до  $-42,14 \text{ дБ}$  на входе  $G_{m8}$ . Входные каскады  $G_{m1} \dots G_{m8}$  являются частью каскадного предварительного усилителя ПУ. Дифференциальный выходной сигнал ПУ поступает на выходной усилитель ВУ.

Коэффициент усиления напряжения усилителя без учета затухания аттенюатора определяется цепью отрицательной обратной связи  $R_{oc1}, R_{oc2}$  и составляет  $20 \log(1 + R_{oc1}/R_{oc2})$ . Величина коэффициента усиления выбрана таким образом, чтобы при среднем затухании аттенюатора  $-21,07 \text{ дБ}$  общий коэффициент усиления микросхемы был равен  $20,0 \text{ дБ}$ , тогда коэффициент усиления усилителя равен

$$20 \text{ дБ} + 21,07 \text{ дБ} = 41,07 \text{ дБ}.$$

Сопротивление  $R_{oc1}$  является фиксированным и для получения минимального шума усилителя выбрано равным  $20,0 \text{ Ом}$ , а номинальное значение сопротивления  $R_{oc2} = 2242 \text{ Ом}$  устанавливается лазерной подгонкой.

Регулирование усиления (РУ) осуществляется через ИРУ управляющими напряжениями  $U_{p+}, U_{p-}$  на дифференциальных входах РУ. Изменение дифференциального управляющего напряжения в пределах  $\pm 0,625 \text{ В}$  вызывает изменение распределения выходных напряжений ИРУ, обозначенных на рис. 3, 4 как  $U_i$ , где  $i = 1, 2, \dots, 8$ . Напряжения  $U_i$  воздействуют на генераторы токов входных каскадов  $G_{mi}$ , увеличивая или уменьшая токи соответствующих каскадов. Одновременно могут быть активированы не более двух каскадов  $G_{mi}$ , а остальные находятся в пассивном режиме. В активированном режиме ток транзистора Т3 каскада  $G_{mi}$  имеет величину не менее  $0,8 \text{ мА}$ , а в пассивном режиме — не более  $15 \text{ мкА}$ . Общий ток всех каскадов  $G_{mi}$  задается генератором тока  $I_2$ , который управляется от ИСТ. Ток  $I_2 = 2,08 \text{ мА}$  остается неизменным во всех режимах регулирования усиления. Напряжение  $U_3$  в общей эмиттерной цепи всех генераторов тока каскадов  $G_{mi}$  изменяется от  $-1,56 \text{ В}$  при

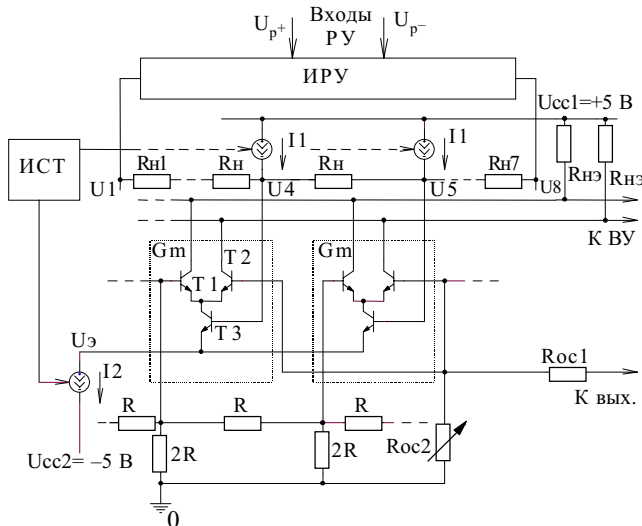


Рис. 4. Эквивалентная схема входной цепи и предварительного усилителя

крайних значениях усиления микросхемы до  $-2,21$  В при среднем значении.

На рис. 5 показаны три варианта расчетных характеристик распределения напряжений  $U_i$ . Вариант 1 соответствует среднему значению коэффициента усиления микросхемы 20 дБ, когда дифференциальное управляющее напряжение  $U_{p+} - U_{p-} = 0$  В и активированы каскады  $G_{m4}, G_{m5}$ . Вариант 2 соответствует максимальному коэффициенту усиления 40 дБ, когда  $U_{p+} - U_{p-} = 0,625$  В и активированы каскады  $G_{m1}, G_{m2}$ . Вариант 3 соответствует минимальному коэффициенту усиления 0 дБ, когда  $U_{p+} - U_{p-} = -0,625$  В и активированы каскады  $G_{m7}, G_{m8}$ .

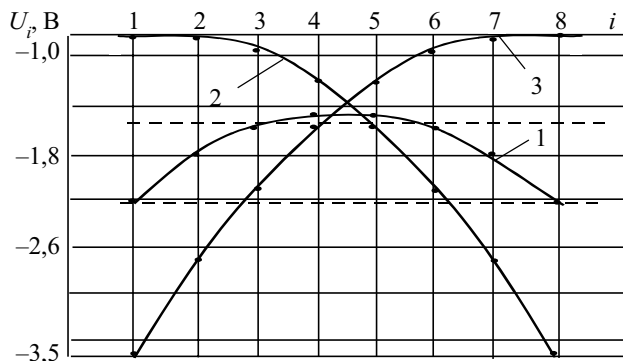


Рис. 5. Распределение напряжений  $U_i$  на выходе ИРУ: 1 —  $U_{p+} - U_{p-} = 0$  В,  $U_{31} = -2,21$  В; 2 —  $U_{p+} - U_{p-} = +0,625$  В,  $U_{32} = -1,56$  В; 3 —  $U_{p+} - U_{p-} = -0,625$  В,  $U_{33} = -1,56$  В

Изменение напряжений  $U_i$  происходит плавно, поэтому входные каскады  $G_{mi}$  также переключаются плавно. При скачкообразном изменении затухания на отводах на 6,02 дБ данная схема интерполяции обеспечивает отклонение от линейного закона регулировочной характеристики не более  $\pm 0,3$  дБ. Крутизна регулировочной характеристики  $S_A = 32$  дБ/В устанавливается выбором коэффициента усиления узла ИРУ. Линеаризованная регулировочная характеристика коэффициента усиления микросхемы может быть представлена выражением

$$A_i(\text{дБ}) = S_A(U_{p+} - U_{p-}) + 20. \quad (1)$$

Особенностью схемы ИРУ является высокое дифференциальное входное сопротивление (до 15 МОм) по управляющим входам РУ. На входах  $U_{p+}, U_{p-}$  включены горизонтальные  $p-n-p$ -транзисторы с токами коллекторов 10 мкА и базовыми токами менее 0,25 мкА. В качестве сопротивлений коллекторной нагрузки входных транзисторов использованы пинч-резисторы с сопротивлением 70 кОм. Дифференциальный коэффициент усиления ИРУ, соответствующий крутизне  $S_A = 32$  дБ/В, равен 4,32. Он определяется как отношение  $\Delta(U_1 - U_8) / \Delta(U_{p+} - U_{p-})$ , где  $\Delta(U_{p+} - U_{p-}) = 0,625$  В.

На рис. 4 приведена упрощенная схема предварительного усилителя (ПУ), в которой каскодная часть схемы представлена эквивалентными сопротивлениями нагрузки  $R_{н3}$ . На каждом из выходов ПУ включен эмиттерный повторитель с емкостной цепью частотной коррекции, компенсирующей спад частотной характеристики на высоких частотах. Выходной усилитель ВУ содержит входные эмиттерные повторители по каждому из входов, дифференциальный усилитель и собственно выходной буферный усилитель. Для получения необходимой нагрузочной способности ( $R_L = 500$  Ом,  $C_L = 5$  пФ) выходные  $n-p-n$ -транзисторы имеют многосекционную конструкцию с количеством секций 12 и 4. В основном усилительном канале от входа до выхода микросхемы используются только вертикальные  $n-p-n$ -транзисторы, что позволяет получить полосу пропускания усилителя до 30 МГц из-за более высокой граничной частоты  $f_T$   $n-p-n$ -транзисторов. В ВУ предусмотрены внутренние цепи частотной коррекции с помощью конденсаторов прямой и обратной связи. Номинальные значения емкостей конденсаторов находятся в пределах от единиц пФ до 20 пФ.

Для подавления синфазного сигнала в ПУ встроены вспомогательный усилитель, дифференциальные входы которого подключены с одной стороны к входному заземляющему выводу, а с другой стороны к выводу, относительно которого отсчитываются выходные сигналы. Вспомогательный усилитель обрабатывает разность напряжений между входным и выходным заземлением в пределах  $\pm 100$  мВ.

(Данная схема интерполяции регулирования усиления применяется в некоторых микросхемах широкополосных VGA фирмы Analog Devices (США) с обозначением "X-AMP".)

Моделирование электрической схемы широкополосного усилителя по программе PSPICE требует, чтобы SPICE-параметры активных элементов схемы максимально точно соответствовали реальным параметрам элементов, измеренным на тестовых элементах, изготовленных по принятой технологии. Однако при отсутствии тестовых элементов для оценки характеристик проектируемой микросхемы можно использовать расчетные SPICE-параметры. Расчет параметров базируется на исходных параметрах полупроводниковой пластины, параметрах эпитаксиального слоя, топологических параметрах и электрических режимах активных элементов.

Расчету SPICE-параметров предшествуют технологические расчеты диффузионных профилей, определение глубины эмиттера и толщины базы, определение концентрации примесей в области эмиттера, базы, кол-

лктора и в скрытом слое. На основании этих параметров оцениваются резистивные свойства областей транзистора и, в частности, объемные сопротивления эмиттера, коллектора и базы. При этом отдельно определяются сопротивления активной базы и пассивной базы с учетом геометрии транзистора. В вертикальном  $n-p-n$ -транзисторе с двойным базовым контактом сопротивление базы будет уменьшаться вдвое, а в многосекционных транзисторах — дополнительно уменьшаться в  $N$  раз, где  $N$  — количество секций.

При окончательной оценке сопротивления базы RB учитывается, что, согласно расчетам Хаузера, вследствие распределенного характера базового тока и малых концентраций тока эмиттера (что имеет место в широкополосном усилителе) эффективное базовое сопротивление RB равно 1/3 от величины геометрического базового сопротивления.

На частотные свойства микросхемы существенное влияние оказывают время переноса заряда через базу и емкости конденсаторов, входящие в эквивалентную схему транзистора и математическую модель Гуммеля–Пуна. Расчет их проводится по известным формулам, в которые входят напряжение смещения обратносмещенного  $p-n$ -перехода, концентрация примесей и другие электрофизические параметры. Для расчета емкостей конденсаторов необходимо знать площади  $p-n$ -переходов исходя из топологии и глубины областей транзисторов.

Полная система SPICE-параметров, использованная при моделировании, содержит 32 параметра. В таблице приведены наиболее важные параметры, оказывающие наибольшее влияние на расчет статических и частотных характеристик.

Моделирование электрической схемы широкополосного усилителя проводилось при напряжениях пи-

тания  $\pm 5$  В. Результаты расчета изменения режимов в процессе регулирования коэффициента усиления напряжения  $A_u$  приведены на рис. 5. Отклонение от линейного закона регулирования, заданного выражением (1), не превышает  $\pm 0,3$  дБ, что свидетельствует о высоком качестве схемы интерполятора.

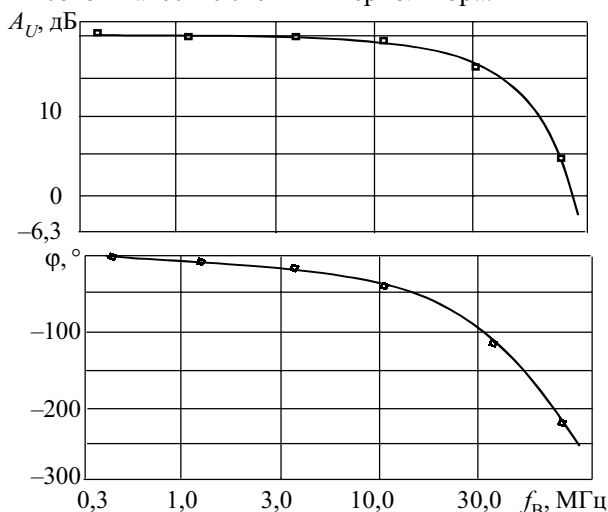


Рис. 6. Расчетные АЧХ и ФЧХ широкополосного усилителя ( $U_{p^+} - U_{p^-} = 0$  В)

Расчетные амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная (ФЧХ) характеристики микросхемы представлены на рис. 6. Полоса пропускания  $f_B$  на уровне 3 дБ примерно равна 30 МГц, а фазовый сдвиг  $\varphi$  на данной частоте равен  $-90^\circ$ , что соответствует результатам измерений микросхем аналогов. Моделирование показывает, что в данной электрической схеме и конструкции наибольшее влияние на полосу пропускания оказывает емкость "коллектор–подложка" CJS вертикальных  $n-p-n$ -транзисторов. Для расширения полосы пропускания требуется оптимизация конструкции с целью уменьшения паразитных емкостей и оптимизация электрической схемы, особенно элементов частотной коррекции.

### Заключение

Рассмотрены основные вопросы проектирования микросхем широкополосных усилителей диапазона 40 МГц с аналоговым регулированием коэффициента усиления. Для успешного проектирования такого класса микросхем требуется применение современной технологии изготовления кристалла микросхемы и оптимальные топологические решения элементов схемы.

Рассмотрена структурная схема микросхемы и определены критерии выбора электрических схем основных узлов.

Моделирование микросхемы с применением программы PSPICE позволило проверить правильность выбранных топологических и схемотехнических решений.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Otaka S., Takemura G., Tanimoto H. A low-power low-noise accurate linear-in-dB variable-gain amplifier with 500-MHz bandwidth // IEEE Journal of Solid-State Circuits.— 2000.— Vol. 35, N 12.— P. 1942—1948.
2. Rijns J. J. F. CMOS low-distortion high-frequency variable-gain amplifier // Ibid.— 1996.— Vol. 31, N 7.— P. 1029—1034.

### SPICE-параметры

| Параметр   | Значение      |               |
|--|---------------|---------------|
|  | $n-p-n$       | $p-n-p$       |
| BF Максимальный коэффициент передачи тока в нормальном режиме в схеме с общим эмиттером (без учета токов утечки) | 120           | 40            |
| IS Ток насыщения при температуре среды 27°C, А   | 106.00000E-18 | 230.00000E-18 |
| RB Объемное сопротивление базы (максимальное) при нулевом смещении перехода «база—эмиттер», Ом                   | 300,0         | 150,0         |
| RE Объемное сопротивление эмиттера, Ом   | 4,0           | 10,0          |
| RC Объемное сопротивление коллектора, Ом   | 150,0         | 150,0         |
| CJE Емкость эмиттерного перехода при нулевом смещении, Ф   | 25.0000E-14   | 50.0000E-14   |
| CJS Емкость «коллектор—подложка» при нулевом смещении, Ф   | 1.0000E-12    | 1.5000E-12    |
| TF Время переноса заряда через базу в нормальном режиме, с   | 40.0000E-12   | 40.0000E-10   |
| CJC Емкость коллекторного перехода при нулевом смещении, Ф   | 17.5000E-14   | 30.0000E-14   |

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. ф.-м. н. И. П. ОСТРОВСКИЙ,  
С. Н. МАТВИЕНКО, А. М. ВУЙЦИК

Украина, г. Львов, НУ «Львовская политехника»  
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию  
25.05 2005 г.

Оппонент к. т. н. А. А. НИКОЛЕНКО  
(ОНПУ, г. Одесса)

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ SiGe

*Предложен интеллектуальный датчик для измерения давления и температуры с коррекцией характеристик кремниевых измерительных тензорезисторов по температуре.*

В настоящее время промышленность нуждается в мультисенсорных системах для контроля тех или иных параметров технологических процессов в широком диапазоне температур. В этих системах в качестве чувствительных элементов датчиков давления, ускорения, силы широко используют пьезорезисторные чувствительные элементы [1]. Высокие эксплуатационные характеристики и низкая стоимость этих сенсоров определяются микроэлектронной технологией их производства.

Особый интерес представляют собой нитевидные кристаллы (НК) твердого раствора  $Si_{1-x}Ge_x$  ( $x=0,01...0,05$ ) [2]. Эти кристаллы имеют совершенную поверхность и очень большую механическую прочность. С другой стороны, они очень чувствительны к давлению и температуре. Деформация упругого элемента (кремниевое или металлическое) измеряется с помощью тензоэлемента, который формируется на его поверхности.

Вместе с тем генерируемый тензомостом сигнал зашумлен, имеет небольшую амплитуду, смещение нуля и максимального значения. Кроме того, чувствительность и смещение нуля тензомоста изменяются при изменении температуры. На рис. 1 показан пример зависимости выходного напряжения моста  $U$  от

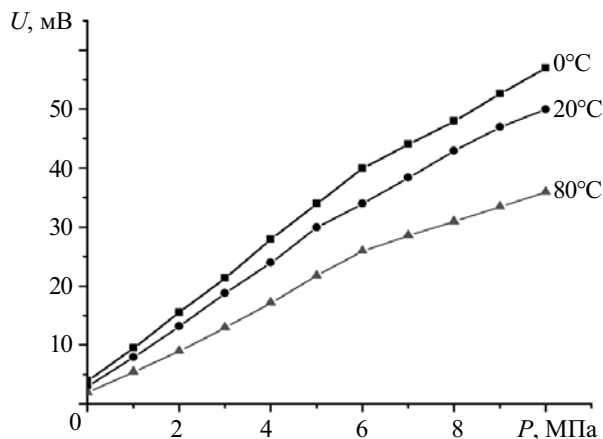


Рис. 1. Типичная характеристика первичного преобразователя на основе НК твердого раствора  $Si_{1-x}Ge_x$

приложенного к сенсору давления  $P$ . Как видим, при изменении температуры на  $90^\circ\text{C}$  напряжение изменяется более чем на 30%. При этом нелинейность характеристики преобразователя составляет более 4%. Поэтому сигнал нуждается во вторичном усилении и обработке.

Значительный резерв в создании многофункциональных датчиков лежит в области схемотехнических решений. Методами формирования специальных измерительных цепей и обработки измерительной информации удается даже при одном чувствительном элементе выделить информацию о сопутствующих физических величинах или различных параметрах одной физической величины.

Как известно, температурная коррекция характеристик кремниевых измерительных преобразователей давления с помощью аналоговых схем требует более тщательной подстройки параметров и не обеспечивает высокой точности во всем диапазоне рабочих температур датчика [3]. Наиболее эффективным направлением измерительной техники стала разработка интеллектуальных датчиков с использованием современных микроконтроллеров и цифровых сигнальных процессоров (ЦСП), что позволяет обеспечить эффективную линейризацию и температурную коррекцию характеристик преобразователей давления, осуществить цифровую фильтрацию и вывод информации на табло или через интерфейс RS232 на персональный компьютер.

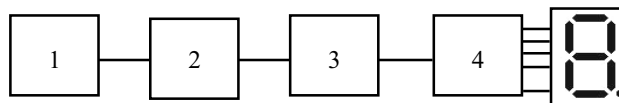


Рис. 2. Блок-схема датчика:

1 — схема питания первичного преобразователя; 2 — мост Уинстона; 3 — схема преобразования сигнала; 4 — схема обработки сигнала

В данной работе предложен интеллектуальный датчик для измерения давления и температуры с коррекцией характеристик кремниевых измерительных тензорезисторов по температуре на основе НК твердого раствора  $Si_{1-x}Ge_x$  ( $x=0,01...0,05$ ).

На рис. 2 показана блок-схема датчика. Выбор элементной базы в основном определяется требованиями к характеристикам и параметрам разрабатываемого сенсора, а также его ценой.

В последнее время на мировом рынке микроэлектроники появились специализированные инструментальные усилители и быстродействующие микроконтроллеры, которые имеют множество

дополнительных функций. Безупречным лидером в производстве аналоговых интегральных микросхем (ИМС) и ЦСП является фирма Analog Devises. В конце 2004 г. Analog Devises выпустила на рынок инструментальный усилитель (ИУ) AD8555 с автоматическим смещением нуля и программируемым коэффициентом усиления и выходного смещения [4]. В результате максимальное входное напряжение смещения составляет 10 мкВ в диапазоне температур от -40 до +125°C с максимальным дрейфом 65 нВ/°C.

На рис. 3 представлена функциональная схема ИУ AD8555. Три усилителя (A1, A2, A3) с автоматическим смещением нуля формируют ИУ, коэффициент усиления которого программно задается в диапазоне от 70 до 1280 с шагом 1 через последовательный интерфейс. Цифроаналоговый преобразователь (DAC) задает смещение выходного сигнала. В ИУ входят выходной усилитель A4, фиксатор уровня A5.

Дискретизация и обработка сигнала в разработанном нами датчике осуществляется с помощью микроконтроллера Atmega8 фирмы Atmel, который представляет собой 8-битный микроконтроллер, основанный на

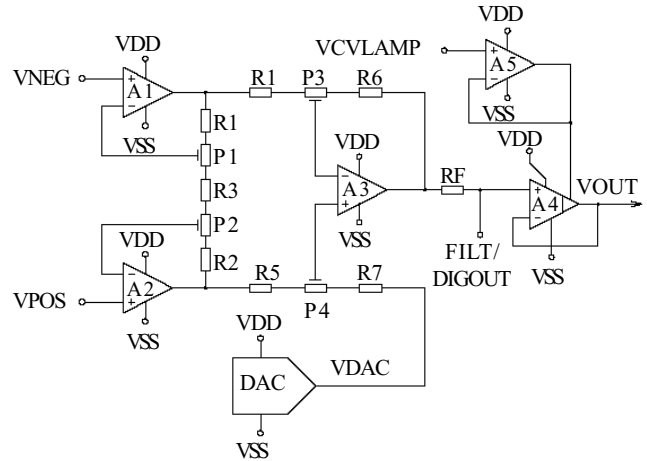


Рис. 3. Функциональная схема инструментального усилителя AD8555

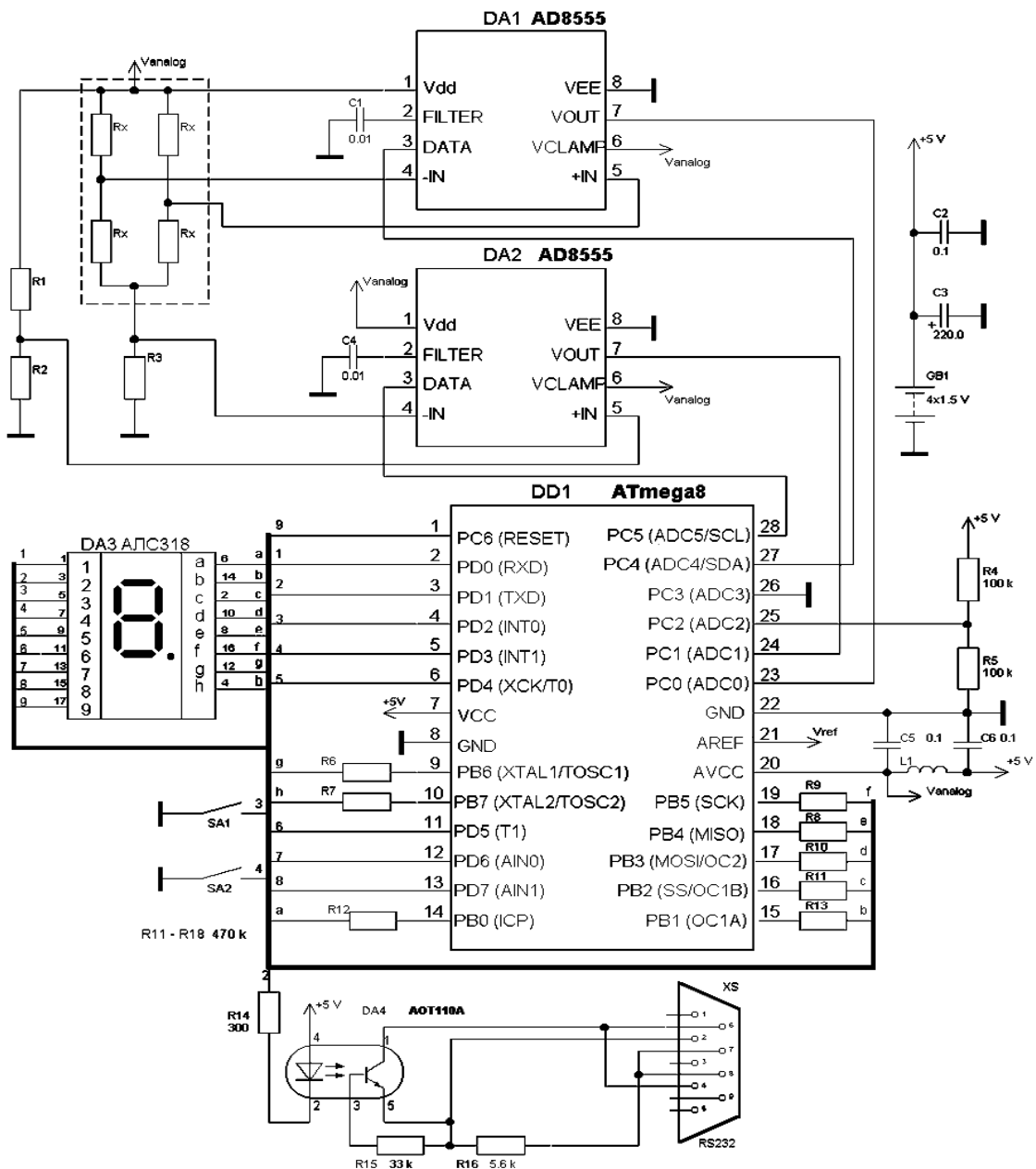


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема интеллектуального датчика

RISC-архитектуре. Atmega8 имеет 8 кбайт FLASH-памяти, 512 байт EEPROM, 1 кбайт SDRAM, 23 порта ввода-вывода, 32 регистра общего назначения, три таймера, USART, интерфейс I2C, 6-канальный 10-битный аналогово-цифровой преобразователь, сторожевой таймер, порт SPI, пять режимов сохранения электроэнергии. Ядро Atmega8, выполняя регистровую инструкцию, за один такт синхронизации обеспечивает большую производительность с малым потреблением энергии [5].

На рис. 4 показана принципиальная электрическая схема разработанного интеллектуального датчика. Первичным преобразователем является мост Уинстона с чувствительными тензорезисторами с большим температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), которые одновременно выполняют функцию сенсора температуры. Тензорезисторы изготавливались на основе НК твердого раствора  $Si_{1-x}Ge_x$  с удельным сопротивлением 0,01—0,02 Ом·см, коэффициентом тензочувствительности 100—140.

Пропорциональное к деформации тензорезисторов дифференциальное напряжение с диагонали измерительного моста подается на вход ИУ DA1. ИМС AD8555 усиливает сигнал до уровня, необходимого для преобразования его в цифровой вид, с помощью АЦП, который встроен в микроконтроллер DD1 (вход ADC0). Конденсатор C1 вместе с внутренним резистором RF ИМС AD8555 (см. рис. 3) представляет собой фильтр низкой частоты (ФНЧ), который необходим для выполнения критерия Найквиста для АЦП.

В качестве сенсора температуры, воздействующей на тензопреобразователь, использована схема «мост в мосте», состоящая из четырех тензорезисторов, образующих рабочий мост тензопреобразователя. В свою очередь рабочий мост служит одним из плеч внешнего моста, другими плечами которого являются соответственно резисторы R1—R3. Резистор R1 используется для балансировки начального выходного уровня датчика температуры. Сигнал температуры усиливается ИУ DA2 и подается на второй вход АЦП (ADC1).

Микроконтроллер DD1 выполняет следующие основные функции:

- преобразование сигналов с аналоговой формы в цифровую;
- обработка сигнала, которая включает линеаризацию и температурную коррекцию характеристик преобразователей давления, цифровую фильтрацию сигнала;
- управление инструментальными усилителями DA1 и DA2 ;
- вывод информации на индикатор DA3;
- вывод информации на персональный компьютер через интерфейс RS232 (преобразование уровней и гальваническая развязка осуществляются с помощью оптрона DA4);
- слежение за напряжением питания (вход ADC2 и резисторы R4 и R5);
- опрос кнопок SA1 и SA2.

С помощью кнопок SA1 и SA2 задаются режимы работы датчика. Кроме того, кнопки служат источниками внешних прерываний для микроконтроллера, при нажатии которых он выходит из «спящего» режима.

Программа для микроконтроллера написана на языке программирования С и компилировалась с помощью компилятора CodeVisionAVR [6], а прошивка программы осуществлялась с помощью программатора, описанного в [7].

Основной недостаток чувствительных элементов на основе НК — большой разброс параметров. Размещение во FLASH-памяти микроконтроллера тарировочной таблицы, индивидуальной для каждого преобразователя, позволяет достичь высокой точности преобразования. Тарировочная таблица представляет собой поправочные коэффициенты, которые определяются при градуировке первичного преобразователя датчика из семейства тензорезистивных характеристик для фиксированных температур.

Малые габариты микроконтроллера, работоспособного в расширенном диапазоне рабочих параметров, позволяют встраивать его непосредственно в корпус датчика.

Градуировка датчика проводилась с использованием прецизионного датчика давления МП-2500 терморегулятора РИФ-101.

Разработанный датчик при этом имеет следующие характеристики:

- диапазон рабочих давлений 0—10 МПа;
- диапазон рабочих температур 0 — +85°C;
- допускаяемая основная погрешность датчика составляет 0,2;
- отклонение от линейности, включая гистерезис, —0,1%.

Схема ориентирована на применение с сенсорами физических величин на основе невидимых кристаллов SiGe, однако может применяться с любыми другими кремниевыми (чувствительными к давлению) элементами, которые имеют большой ТКС.

\*\*\*

Предлагаемый датчик обеспечивает высокую точность измерения температуры, давления, ускорения, силы во всем диапазоне рабочих температур. Учет характеристики датчика программным способом позволяет легко автоматизировать процесс калибровки и использовать первичные преобразователи с большим разбросом параметров.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Распонов В. Я. Микроэлектромеханические системы. Прямые преобразователи // Датчики и системы.— 2005.— № 4.— С. 37—41.
2. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Лавитская Е. Н. и др. От полупроводниковых тензорезисторов к микроэлектронным датчикам // Датчики и системы.— 2001.— № 6.— С. 2—7.
3. Слива Е. Коррекция по температуре измерительных преобразователей физических величин на базе микроконтроллера MSP430f149 фирмы TEXAS INSTRUMENTS // ИНФОРМОСТ.— Средства связи.— 2001.— № 2.— <http://www.informost.ru>.
4. AD8555 — Zero-Drift, Single-Supply, Sensor Signal Amplifier with Digitally Programmable Gain and Offset. Data Sheet, Rev. Prc, 2004. ANALOG DEVICES <http://www.analog.com>
5. Atmega8L — 8-bit with 8K Bytes In-System Programmable Flash. Data Sheet, Rev. 2486H—AVR—09/02, 2002. Atmel Corporation. <http://www.atmel.com>
6. CodeVisionAVR. <http://www.hpinfotech.ro/index.html>
7. Programming a Spider's Brain. [http://www.xs4all.nl/~sbolt/e-spider\\_prog.htm](http://www.xs4all.nl/~sbolt/e-spider_prog.htm)

А. Н. ИВАЩЕНКО, д. ф.-м. н. Ю. М. ШВАРЦ,  
к. ф.-м. н. М. М. ШВАРЦ

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарёва  
E-mail: iva@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
03.02—19.07 2005 г.

Оппонент А. Х. ДУНАЕНКО  
(ОАО "Кварц", г. Черновцы)

## ДИОДНЫЙ СЕНСОР ТЕМПЕРАТУРЫ: АНАЛИЗ ПРИБОРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

*Исследование влияния составляющих погрешности измерения, связанных с используемой вторичной аппаратурой, позволило достичь прецизионной точности кремниевых диодных сенсоров температуры.*

Необходимость создания нового поколения высокоточных и взаимозаменяемых широкодиапазонных датчиков температуры на основе кремниевых диодов обусловлена требованиями современной сенсорной техники, и исследования в этом направлении продолжаются [1—4]. Проведенный теплофизический расчет разработанного нами диодного сенсора температуры (ДСТ) с учетом всех его конструктивных элементов [5], а также эффекта саморазогрева чувствительного элемента датчика и влияния шумов [6], показал, что его предельная точность измерения составляет порядка 0,01 К.

Задачей данной работы является исследование влияния составляющих погрешности измерения температуры, связанных с используемой вторичной аппаратурой, для различных режимов работы сенсора.

### Расчетные соотношения

Функция измерения температуры  $T$  с помощью ДСТ представляется в виде

$$T = f(U(I)), \quad (1)$$

где  $U$  — падение напряжения на термодиоде при пропускании через него прямого рабочего тока  $I$ . Такой метод проведения измерений является косвенным [7], и анализ его погрешностей проводится согласно [8].

Суммарное среднеквадратическое отклонение (СКО) измерения температуры определяем из выражения

$$S(T) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial U}\right)^2 S^2(U) + \left(\frac{\partial f}{\partial I}\right)^2 S^2(I)}, \quad (2)$$

где частные производные функции (1)  $\partial f/\partial U$  и  $\partial f/\partial I$  (обозначим их  $k_U$  и  $k_I$ , соответственно) называют коэффициентами влияния составляющих погрешности измерения температуры [9, с. 20],  $S(U)$  и  $S(I)$  — СКО результата измерения напряжения и установки тока, соответственно.

Обозначим вклад в  $S(T)$  погрешности измерения вольтметра как  $S_U(T)$ , а источника тока —  $S_I(T)$ . Тогда выражение (2) будет иметь вид

$$S(T) = \sqrt{S_U^2(T) + S_I^2(T)}. \quad (3)$$

Для исследования погрешности аппаратуры необходимо провести оценку  $k_U$  и  $k_I$  в рабочем диапазоне температур и определить максимально возможные вклады дисперсии вольтметра и источника тока в результат измерения при использовании ДСТ из выражений

$$S(U) = \frac{S_U(T)}{k_U}; \quad (4)$$

$$S(I) = \frac{S_I(T)}{k_I}. \quad (5)$$

При этом  $k_U$  и  $k_I$  определяются из выражений

$$k_U = \frac{1}{\partial U/\partial T}; \quad (6)$$

$$k_I = \frac{\partial U/\partial I}{\partial U/\partial T}, \quad (7)$$

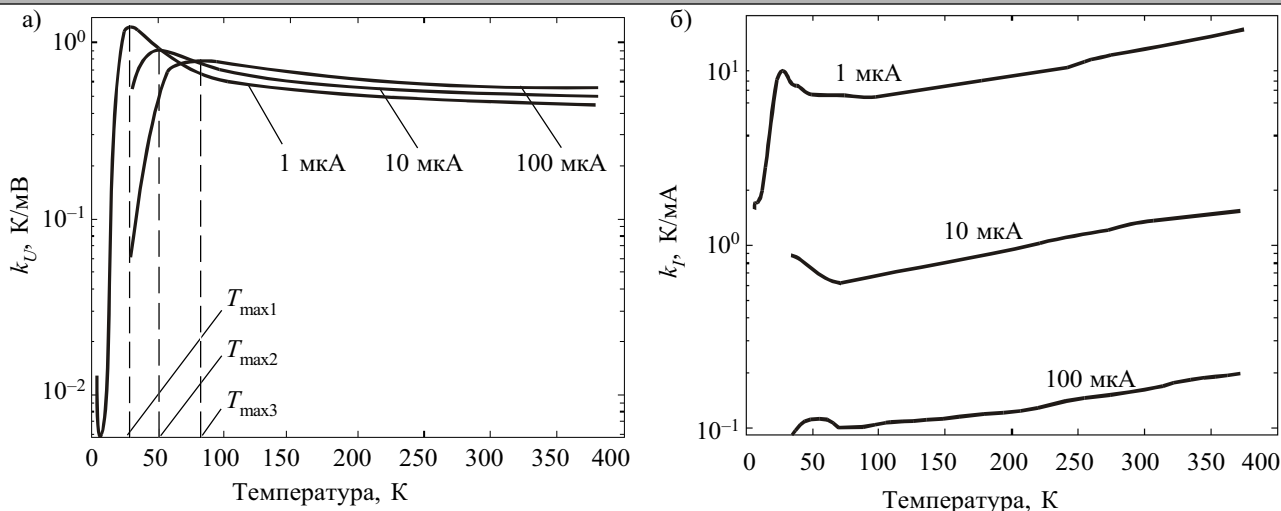
где  $\partial U/\partial T$  (температурная чувствительность) и  $\partial U/\partial I$  (дифференциальное сопротивление сенсора) являются температурно-зависимыми величинами.

### Эксперимент

В работе исследованы разработанные нами кремниевые диодные сенсоры в диапазоне температур 4,2—373 К. Для нахождения дифференциального сопротивления на автоматизированной установке измерены вольт-амперные характеристики в интервале токов  $10^{-11}$ — $10^{-2}$  А. Термостатирование образцов осуществлялось в парах жидкого гелия с погрешностью поддержания температуры  $\pm 0,01$  К. Погрешность измерения напряжения в диапазоне 0,1—2 В не хуже  $\pm 20$  мкВ, тока —  $\pm 5\%$ .

Для определения температурной чувствительности сенсоров измерены их термометрические характеристики на метрологическом стенде УГТ-А для разных значений рабочих токов (1, 10 и 100 мкА). Стенд обеспечивает поддержание рабочего тока на уровне  $\pm 0,05\%$ . Погрешность измерения напряжения не хуже  $\pm 10$  мкВ в диапазоне напряжений 0,1—2 В. Основная абсолютная ошибка измерения температуры не превышала 0,03 К.

Согласно методам, изложенным в [10, 11], проведена аппроксимация и численное дифференцирование полученных экспериментальных данных и рас-



Температурные зависимости коэффициентов  $k_U$  (а) и  $k_I$  (б) при разных рабочих токах сенсора

считаны температурные зависимости чувствительности и дифференциального сопротивления.

С помощью выражений (3) и (4) получены коэффициенты  $k_U$  и  $k_I$  температурные зависимости которых представлены на рисунке.

Как видно из рисунка, для рабочих токов 1, 10 и 100 мкА коэффициент  $k_U$  имеет максимум при температурах  $T_{\max 1} \approx 30$  К,  $T_{\max 2} \approx 50$  К и  $T_{\max 3} \approx 85$  К, соответственно. При  $T < T_{\max}$  его значение резко снижается, например, до  $\approx 0,006$  К/мВ для тока 1 мкА. Для  $T > T_{\max}$  коэффициент  $k_U$  уменьшается с увеличением температуры. В верхней точке рабочего диапазона при  $T = 373$  К величина  $k_U$  составляет 0,44, 0,48 и 0,54 К/мВ для токов 1, 10 и 100 мкА, соответственно.

Для определения требований к вольтметру зададимся максимальным значением  $S_U(T)$ , равным 0,01 К. В табл. 1 приведены максимальные значения коэффициента влияния точности измерения напряжения  $k_{U\max}$  и допустимые значения  $S(U)_{\max}$ , вычисленные с помощью (4) для разных значений  $I$ . Расчет проведен исходя из величины падения напряжения на ДСТ порядка 1 В при температуре максимума  $k_U$  (см. рис.).

Таблица 1  
Результаты расчета  $k_{U\max}$  и  $S(U)_{\max}$  при разных значениях рабочего тока сенсора

| I, мкА | $k_{U\max}$ , К/мВ | $S(U)_{\max}$           |                           |
|--------|--------------------|-------------------------|---------------------------|
|        |                    | Абсолютное значение, мВ | Относительное значение, % |
| 1      | 1,27               | 0,008                   | 0,0008                    |
| 10     | 0,93               | 0,011                   | 0,0011                    |
| 100    | 0,8                | 0,013                   | 0,0013                    |

Значения  $k_{U\max}$ , представленные в табл. 1, характерны для узкого диапазона температур  $T_{\max} \pm 10$  К. При других температурах рабочего диапазона требования к  $S(U)$  можно значительно снизить. Так, для тока 1 мкА в высокотемпературной области СКО измерения напряжения можно увеличить более чем в два раза без ухудшения точности измерения температуры. В интервале низких температур (4,2—15 К)  $S_U(T)$  не превышает 0,01 К при  $S(U) = 0,1$  мВ.

При всех использованных рабочих токах коэффициент  $k_I$  имеет максимальное значение в верхней точке рабочего диапазона температур при  $T = 373$  К (см. рис.),

для которой и следует проанализировать влияние СКО установки тока на температурную погрешность ДСТ. Для оценки требований по точности установления тока задаемся максимально допустимым значением  $S_I(T)$ , равным 0,01 К.

Таблица 2  
Результаты расчета  $k_{I\max}$  и  $S(I)_{\max}$  при разных значениях рабочего тока сенсора

| I, мкА | $k_{I\max}$ , К/мкА | $S(I)_{\max}$            |                           |
|--------|---------------------|--------------------------|---------------------------|
|        |                     | Абсолютное значение, мкА | Относительное значение, % |
| 1      | 13                  | $7,7 \cdot 10^{-4}$      | 0,077                     |
| 10     | 1,4                 | $7,1 \cdot 10^{-3}$      | 0,071                     |
| 100    | 0,17                | $5,9 \cdot 10^{-2}$      | 0,059                     |

В табл. 2 приведены предельные значения коэффициентов  $k_{I\max}$  и допустимые значения СКО установления тока  $S(I)_{\max}$ , рассчитанные с помощью (5). Из результатов, представленных в табл. 2, следует, что значение максимально допустимого относительного значения  $S(I)_{\max}$  растет с уменьшением тока.

**Заключение**

На основе результатов исследований электрических и термометрических характеристик разработанных нами кремниевых диодных сенсоров температуры и анализа погрешности, обусловленной влиянием источника тока и измерителя напряжения, определены требования к аппаратуре, позволяющей обеспечить точность измерения на уровне сотых долей К, которые состоят в следующем:

— для измерителя падения напряжения допустимые относительные величины среднеквадратического отклонения результата измерения напряжения  $S(U)_{\max}$  составляют 0,0008, 0,011 и 0,013% для значений рабочего тока 1, 10 и 100 мкА, соответственно;

— для источника тока допустимые относительные величины СКО измерения  $S(I)_{\max}$  составляют 0,077, 0,071 и 0,059% для значений рабочего тока 1, 10 и 100 мкА, соответственно.

С учетом сформулированных требований создана автоматизированная система для метрологической аттестации диодных сенсоров температуры в диапазоне 4,2—373 К. При разработке системы нами учи-

тивались новые тенденции в создании измерителей температуры, базирующиеся на возможностях современной элементной базы. Измеритель напряжения и источник тока выполнены на базе микросхем фирмы Analog Device AD7714 и AD706, соответственно. Использование микросхем аналого-цифровых преобразователей высокого разрешения (до 24 бит) типа «сигма-дельта АЦП» позволило достичь прецизионной точности диодных сенсоров температуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Yeager C. J., Scott C. S. A review of cryogenic thermometry and common temperature sensors // IEEE Sensors Journal.— 2001.— Vol. 1, N 4.— P. 252—360.
2. Scott C. S., Swinehart P. R., Yeager C. J. A new cryogenic diode thermometers // Advanced Advances in Cryogenic Engineering. (American Institute of Physics, NY).— 2002.— Vol. 47B.— P. 1620—1627.
3. Scott C. S., Swinehart P. R. Long-term stability of cryogenic diode // Ibid.— P. 1636—1643.
4. Шварц Ю. М., Шварц М. М., Иващенко А. Н. и др. Новое поколение микроэлектронных кремниевых термодатчиков // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 3.— С. 59—61.

5. Круковский П. Г., Шварц Ю. М., Круковский С. П. Анализ погрешностей измерения кремниевого датчика температуры // Промышленная теплотехника.— 2002.— Т. 24, № 2—3.— С. 154—159.
6. Shwarts Yu. M., Sokolov V. N., Shwarts M. M., Venger E. F. Temperature sensors for extreme electronics / In Temperature: Its measurement and control in science and industry. AIP Conf. Proceedings. Vol. 7, part 2.— Melville, New York (USA).— 2003.— P. 1127—1132.
7. ДСТУ 2681—94. Метрологія. Терміни та визначення.— Київ: Держстандарт України, 1994.
8. МИ 2083—90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерения и оценивание их погрешностей.— М.: Изд-во стандартов, 1991.
9. Орнатский П. П., Яремчук Н. А. Суммирование погрешностей средств измерений.— Киев: КПИ, 1983.
10. Иващенко А. Н., Шварц Ю. М. Аппроксимация термометрических характеристик кремниевых диодных сенсоров температуры // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.— 2003.— Вып. 38.— С. 61—70.
11. Шварц Ю. М., Шварц М. М., Иващенко О. М. та ін. Моделювання низькотемпературного струмопереносу і чутливість в кремнієвих діодних сенсорах температури // УФЖ.— 2004.— Т. 49, № 10.— С. 1001—1006.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Эггинс Б. Химические и биологические сенсоры.— М.: Техносфера, 2005.— 336 с.**

Первое учебное пособие в новой области на стыке аналитической химии, электроники, физики и медицины. Особенно подробно описаны электрохимические, оптические, гравиметрические, температурные сенсоры, распознавание ионов и молекул, «лаборатории-на-чипе». Пособие предназначено для студентов и специалистов в областях медицинских и биотехнологий, пищевой промышленности и контроля окружающей среды, микробиологов, специалистов, разрабатывающих и применяющих микроаналитические системы.

**Основы построения систем и сетей передачи информации: Учебное пособие для вузов / В. В. Ломовицкий, А. И. Михайлов, К. В. Шестаков, В. М. Щекотихин.— М.: Горячая линия-Телеком, 2005.— 382 с., ил.**

Систематизированы сведения по вопросам построения современных систем и сетей передачи информации. Приведены основные положения и рассмотрены перспективы развития систем восстановления и управления единой сети электросвязи РФ, особенности построения первичных и вторичных сетей связи, цифровой сети с интеграцией служб. Рассмотрены основные подходы и методы оценки эффективности функционирования телекоммуникационных сетей общего пользования. Книга базируется на уже достаточно известных сведениях и подходах к построению систем и сетей передачи информации, а также содержит оригинальный материал по особенностям построения систем связи с повышенной устойчивостью к внешним воздействиям.

Для студентов, обучающихся по направлению 654400 — «Телекоммуникации»; может быть полезна специалистам, занимающимся эксплуатацией средств связи.

**Гордиенко В. Н., Тверецкий М. С. Многоканальные телекоммуникационные системы. Учебник для вузов.— М.: Горячая линия-Телеком, 2005.— 416 с., ил.**

Излагаются базовые принципы построения цифровых многоканальных телекоммуникационных систем, обсуждаются особенности работы оборудования цифровых систем передачи плезиохронной и синхронной цифровой иерархии, рассматриваются вопросы нормирования качества передачи информации по цифровым каналам и трактам, а также особенности применения цифровых систем передачи на современных телекоммуникационных сетях.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности 201000 — «Многоканальные телекоммуникационные системы»; может быть полезен студентам, обучающимся по специальностям: 071700 — «Физика и техника оптической связи», 200900 — «Сети связи и системы коммутации», 201800 — «Защищенные системы связи».

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

К. ф.-м. н. И. И. ИЖНИН, к. т. н. Н. М. ВАКИВ, к. ф.-м. н. А. И. ИЖНИН,  
И. М. СЫВОРОТКА, д. ф.-м. н. С. Б. УБИЗСКИЙ

Дата поступления в редакцию  
11.11 2005 г.

Украина, г. Львов, Научно-производственное предприятие "Карат"  
E-mail: granat@ipm.lviv.ua

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

## МИКРОЧИПОВЫЕ ЛАЗЕРЫ С ПАССИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР Nd:АИГ/Cr<sup>4+</sup>:АИГ

*Разработан макетный образец монолитного твердотельного микрочипового лазера с пассивной модуляцией добротности на основе Nd:АИГ/Cr<sup>4+</sup>:АИГ с применением метода жидкофазной эпитаксии.*

Одной из основных тенденций развития современной электроники является миниатюризация компонентов. В лазерной технике эта тенденция проявляется в быстром развитии технологии производства полупроводниковых лазерных диодов. Однако несмотря на значительный прогресс в данной области и на доминирующие позиции на рынке лазерной техники лазерные диоды не могут полностью удовлетворить расширяющиеся конструкторские требования. В первую очередь это обусловлено фундаментальными физическими ограничениями для полупроводниковых лазеров. Это многомодовый режим излучения, зависимость генерируемой длины волны от температуры р-п-перехода, относительно широкая (порядка 20 МГц) полоса излучения, значительная расходимость лазерного пучка, невозможность генерировать наносекундные и субнаносекундные импульсы излучения, временная нестабильность параметров прибора и т. п.

В то же время полупроводниковые лазерные диоды с успехом используются в качестве источников излучения накачки для компактных твердотельных лазеров, которые в основном лишены недостатков, присущих полупроводниковым лазерам. Прогресс в технологии изготовления полупроводниковых лазеров послужил толчком к появлению новых подходов в конструировании твердотельных лазеров — созданию микролазеров, микрочиповых, волноводных, дисковых лазеров и т. д. Можно сказать, что в этом случае миниатюрные твердотельные лазеры трансформируют «плохое» излучение полупроводниковых лазеров в высококачественные оптические пучки.

Особое место среди миниатюрных твердотельных лазеров занимают микрочиповые лазеры с пассивной модуляцией добротности резонатора [1—3]. Благодаря своим параметрам — малой ( $\leq 1$  нс) длительности импульса, относительно большой (1...20 кВт) пиковой мощности излучения, стабильности пучка, малым геометрическим размерам, дешевизне при массовом производстве — эти приборы находят широкое применение в прецизионной дальнометрии на

малых и средних расстояниях, при мониторинге окружающей среды, контроле загрязнения атмосферы, воды, пищевых продуктов, в медицине, робототехнике, научных исследованиях и т. д. Ключевым моментом в технологии производства микрочиповых лазеров с пассивной модуляцией добротности является осуществление оптического контакта генерирующей среды с насыщающимся поглотителем.

К решению этого вопроса существуют два подхода. Первый предложен исследователями Массачусетского технологического института (США) и базируется на термическом или клеевом соединении пластины генерирующей среды и пластины насыщаемого поглотителя [4, 5]. Иной подход был использован учеными СЕА-LETI (Франция) [6, 7]. Ими было предложено проводить наращивание монокристаллического слоя насыщаемого поглотителя методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на подложку, которая является генерирующей средой. Данный подход был с успехом продемонстрирован на монокристаллических соединениях со структурой граната, когда подложкой служила пластина генерирующей среды Nd:АИГ, на которую наращивался слой Cr<sup>4+</sup>:АИГ, являющийся пассивным модулятором. С нашей точки зрения технология изготовления активных элементов импульсных лазеров с применением метода жидкофазной эпитаксии является более привлекательной, особенно когда в качестве рабочих сред используются монокристаллические материалы со структурой граната.

В настоящей работе приведены результаты исследований, проведенных на НПП «Карат» (г. Львов) по разработке активных сред Nd:АИГ/Cr<sup>4+</sup>:АИГ, полученных методом ЖФЭ, а также основные параметры макета лазера с пассивной модуляцией добротности, созданного на их основе.

### Эксперимент

Отметим, что технологические детали получения эпитаксиальных слоев Cr<sup>4+</sup>:АИГ на подложках Nd:АИГ специалистами СЕА-LETI [6, 7] опубликованы не были. Поэтому нами была разработана собственная технология, описанная в [8].

Основные проблемы при изготовлении эпитаксиальных структур для микрочиповых лазеров с пассивной модуляцией добротности связаны с необходимостью достижения высокой концентрации фотоотропных центров Cr<sup>4+</sup> в тетраэдрических позициях гранатовой решетки при достаточно больших толщи-

нах эпитаксиальных слоев (30...200 мкм). Так как параметр решетки эпитаксиального слоя несколько меньше параметра решетки монокристаллической подложки, то это требует постоянной коррекции условий ЖФЭ-роста в течение всего процесса. С другой стороны, т. к. ионы хрома в гранатовой решетке имеют стабильную валентность  $\text{Cr}^{3+}$ , то для получения эпитаксиального слоя АИГ, легированного ионами хрома с валентностью  $4+$ , необходимо дополнительное легирование катионами с валентностью  $2+$ , например  $\text{Ca}^{2+}$  или  $\text{Mg}^{2+}$  [9—11].

На основании проведенного анализа в качестве компенсирующей примеси для проведения технологических экспериментов были выбраны ионы  $\text{Mg}^{2+}$ , т. к. они занимают преимущественно октаэдрические позиции гранатовой решетки и имеют более близкие значения ионного радиуса к ионному радиусу  $\text{Al}^{3+}$ , что в конечном итоге способствует расположению ионов  $\text{Cr}^{4+}$  в тетраэдрических позициях. Заметим, что даже в этом случае только несколько процентов общего количества ионов хрома занимают тетраэдрические позиции в зарядовом состоянии  $\text{Cr}^{4+}$  и, таким образом, создают фототропные центры, необходимые для работы пассивного модулятора добротности.

Рост эпитаксиальных пленок  $\text{Cr}^{4+}$ :АИГ на подложках Nd:АИГ проводили на модернизированной установке ЖФЭ "Garnet-3" (LPAI, Франция), содержащей 5-зонный нагревательный блок, что обеспечивало точность поддержания температуры  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  в диапазоне температур 600...1200 $^\circ\text{C}$ . Эпитаксиальные слои выращивали по схеме, типичной для ЖФЭ гранатовых соединений [12] из пересыщенных растворов окислов гранатообразующих компонентов и легирующих примесей Cr и Mg в расплаве  $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$ . Детали технологии описаны в [8].

В соответствии с отработанной технологией были выращены эпитаксиальные структуры Nd:АИГ/ $\text{Cr}^{4+}$ :АИГ толщиной до 250 мкм и концентрацией фототропных центров  $\geq 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Типичные спектры поглощения эпитаксиальных слоев  $\text{Cr}^{4+}$ :АИГ с различной концентрацией фототропных центров представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, коэффициент поглощения слоев на длине волны  $\lambda=1,064 \text{ мкм}$  до-

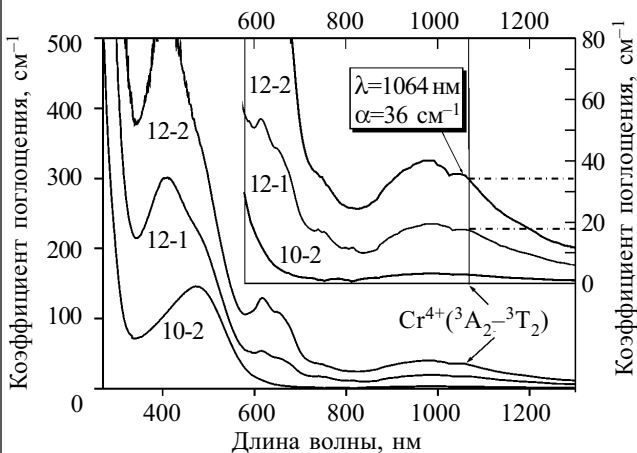


Рис. 1. Спектры поглощения эпитаксиальных слоев  $\text{Cr}^{4+}$ :АИГ с различной концентрацией фототропных центров (надписи у кривых соответствуют различным образцам)

стигал величины  $\alpha \approx 40 \text{ см}^{-1}$ , что свидетельствует об их пригодности для создания микрочипового лазера с пассивной модуляцией добротности.

**Результаты и обсуждение**

Изготовление лазерных резонаторов осуществляли с использованием известных стандартных технологических операций [6, 7]. Эпитаксиальный слой с одной из сторон структуры (нерабочей) механически сошлифовывали, после чего поверхность полировали. Толщину эпитаксиального слоя с другой стороны (рабочей) путем механической шлифовки и полировки доводили до необходимого значения. Основная проблема при такой обработке структуры диаметром 20...30 мм заключалась в необходимости сохранить плоскопараллельность резонатора не хуже  $10''$ .

Для формирования резонатора на соответствующие стороны структуры путем электронного напыления наносили входное и выходное многослойные диэлектрические зеркала с необходимым значением пропускания на длине волны полупроводникового лазера накачки (808 нм) и генерации микрочипового

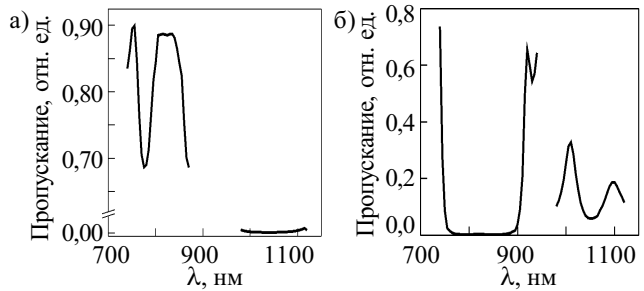


Рис. 2. Спектры пропускания входного (а) и выходного (б) зеркал резонатора

лазера (1064 нм). Входное зеркало характеризовалось высоким пропусканием ( $T > 90\%$  на 808 нм) и высоким коэффициентом отражения ( $R > 99\%$  на 1064 нм, см. рис. 2, а). Выходное зеркало имело высокий коэффициент отражения ( $R > 99\%$  на длине волны накачки 808 нм) и пропускание  $T \approx 7...10\%$  на 1064 нм (длине волны генерации микрочипового лазера) (рис. 2, б). Зеркала состояли из 25—30 периодически напыленных слоев  $\text{SiO}_2$  и  $\text{HfO}_2$  толщиной, кратной  $\lambda/2$ . После этого структура с нанесенными зеркалами разделялась на отдельные лазерные чипы размерами  $2 \times 2 \text{ мм}$ .

Схематическое изображение стенда для исследования характеристик микрочипового лазера представлено на рис. 3. Продольная накачка осуществлялась непрерывным 4-ваттным полупроводниковым лазером АТС-С4000 («Полупроводниковые приборы», г. С.-Петербург, Россия).

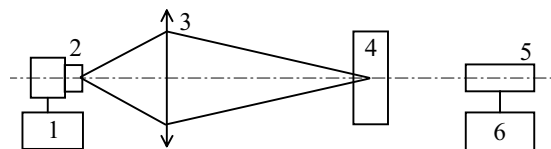


Рис. 3. Схематическое изображение макетного образца микрочипового лазера:

1 — источник питания лазера накачки; 2 — полупроводниковый лазер накачки; 3 — дополнительная фокусирующая оптика; 4 — Nd:АИГ/ $\text{Cr}^{4+}$ :АИГ лазерный резонатор; 5 — коаксиальный фотоэлемент; 6 — цифровой широкополосный осциллограф

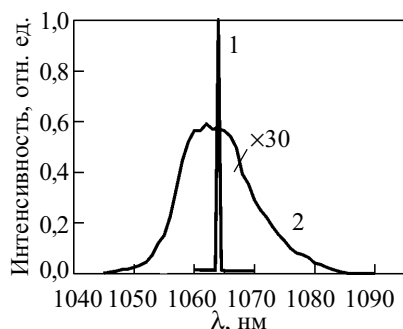


Рис. 4. Спектры излучения Nd:АИГ/ Cr<sup>4+</sup>:АИГ микрочипового лазера: 1 — режим лазерной генерации; 2 — режим спонтанного излучения

Полупроводниковый лазер содержал цилиндрическую микролинзу, которая уменьшала расхождение излучения в одной из плоскостей в 20 раз. Таким образом, результирующее расхождение излучения лазера накачки (FWHM) составляло величину  $10 \times 2^\circ$ . Дополнительная фокусирующая оптика 3 обеспечивала формирование пятна лазера накачки размерами  $200 \times 400$  мкм на расстоянии 200 мкм от поверхности входного зеркала резонатора микрочипового лазера 4. Параметры выходных импульсов измеряли с помощью калиброванного коаксиального фотоэлемента 5 ФЭК-15 (ВНИИ ОФИ, г. Москва, Россия) со временем нарастания сигнала 250 пс и цифрового осциллографа 6 TDS 5052B (Tektronix, США) с полосой частот 500 МГц.

Существование лазерной генерации в разработанном макете Nd:АИГ/Cr<sup>4+</sup>:АИГ микрочипового лазера демонстрируют данные, приведенные на рис. 4. При мощности излучения лазера накачки меньше пороговой ( $\approx 1,1$  Вт) наблюдается широкая полоса люминесценции генерирующей среды Nd:АИГ (кривая 2). Накачка резонатора с мощностью, превышающей пороговую, обеспечивала реализацию режима лазерной генерации (кривая 1), в котором наблюдается очень узкая линия излучения на длине волны 1064 нм.

Работу микрочипового лазера в режиме пассивной модуляции добротности демонстрируют данные рис. 5. Длительность импульса генерации лазера (FWHM) составляла примерно 1,3 нс при частоте повторения 5,5 кГц и мощности в импульсе 1,2 кВт.

#### Выводы

В результате проведенных экспериментов разработан макетный образец монолитного твердотельного микрочипового лазера с пассивной модуляцией добротности на основе эпитаксиальных структур Nd:АИГ/Cr<sup>4+</sup>:АИГ. Продемонстрирована работа микрочипового лазера в режиме пассивной модуляции добротности, что подтвердило пригодность разработанной технологии ЖФЭ-роста эпитаксиальных слоев насыщаемого поглотителя Cr<sup>4+</sup>:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> с параметрами, необходимыми для создания микрочиповых лазеров.

Излучение микрочипового лазера характеризуется следующими параметрами: длительность импульсов (FWHM)  $\approx 1,3$  нс, частота повторения 5,5 кГц,

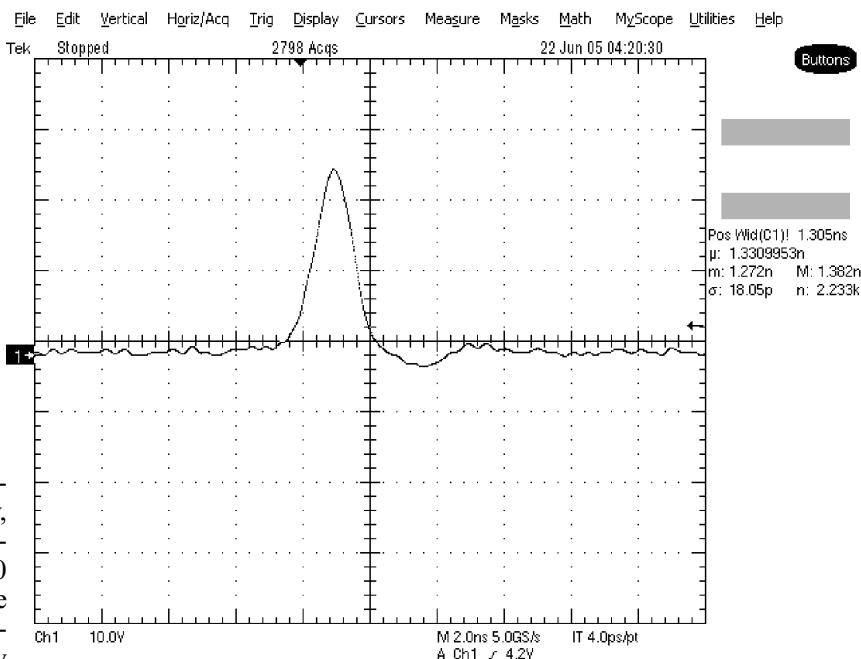


Рис. 5. Осциллограмма формы импульса излучения микрочипового лазера (шкала 400 пс/деление)

мощность излучения в импульсе 1,2 кВт. Полученные параметры соответствуют параметрам, характерным для такого типа микролазеров. Относительно малая мощность излучения в импульсе обусловлена, по нашему мнению, не до конца оптимизированными параметрами лазерных зеркал и формой пятна вводимого излучения полупроводникового лазера накачки.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Zayhowski J. Microchip lasers // Optical Materials.— 1999.— Vol. 11.— P. 255—267.
- Zayhowski J. Passively Q-switched Nd-YAG microchip lasers and applications // J. Alloys and Compounds.— 2000.— Vol. 303/304.— P. 393—400.
- Molva E. Microchip lasers and their applications in optical microsystems // Optical Materials.— 1999.— Vol. 11.— P. 289—299.
- Zayhowski J. Microchip lasers // The Lincoln Lab. Journal.— 1990.— Vol. 3.— P. 427—454.
- Zayhowski J. Q-switched operation of microchip lasers // Opt. Letter.— 1991.— Vol. 16.— P. 575—577.
- Ferretti M. YAG microchip laser development in France // EuroPhotonics.— 1997.— N 1.— P. 34—35.
- Ferrand B., Chambaz B., Couchaud M. Liquid phase epitaxy: a versatile technique for the development of miniature optical components in single crystal dielectric media // Optical Materials.— 1999.— Vol. 11.— P. 101—114.
- Пат. 59061 України. Спосіб виготовлення структур АИГ:Nd/АИГ:Cr<sup>4+</sup> та ГТГ:Nd/ГТГ:Cr<sup>4+</sup> для активних середовищ мікрочипових лазерів з пасивно-модульованою добротністю / М. М. Ваків, І. І. Бжнін, А. О. Матковський та ін.— 2003.— Бюл. № 8.
- Sugimoto A., Nobe Y., Yamagishi K. Crystal growth and optical characterization of Cr,Ca:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> // J. Cryst. Growth.— 1994.— Vol. 140.— P. 349—354.
- Markgraf S. A., Pangborn M. F., Dieckmann R. Influence of different divalent co-dopants on the Cr<sup>4+</sup> content of Cr-doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> // Ibid.— 1997.— Vol. 180.— P. 81—84.
- Frukacz Z., Łukasiewicz T., Malinowski M., Mierczyk Z. Growth of Cr<sup>4+</sup>:YAG crystals for applications in laser technique / Proc. SPIE.— 1995.— Vol. 2373.— P. 74—78.
- Blank S. L., Nielsen J. W. The growth of magnetic garnets by liquid phase epitaxy // J. Cryst. Growth.— 1972.— Vol. 17.— P. 302.

К. ф.-м. н. В. Л. ПЕРЕВЕРТАЙЛО, к. т. н. А. А. ЕПИФАНОВ,  
В. Г. КАРЕНГИН, Л. И. ТАРАСЕНКО

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов  
E-mail: detector@carrier.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
26.04—18.08 2005 г.

Оппонент к. т. н. С. А. ГОРЬБЕВ  
(ОНИИИТ, г. Одесса)

## ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ САМОСКАНИРУЕМЫХ ЛИНЕЙНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ В ИНТРОСКОПИИ И ТОМОГРАФИИ

*Применение интегральных схем формирователей изображения позволяет создать малогабаритную аппаратуру для интроскопии и томографии, в том числе рентгеновские сканеры с повышенным разрешением.*

Твердотельные формирователи изображений широко используются при формировании изображений в видимой области света. Что касается их применения для рентгеновской области спектра, то здесь существует ряд ограничений и особенностей, связанных со слабой эффективностью прямого преобразования энергии рентгеновских квантов в заряд в относительно тонком кремниевом детекторе, изготовленном на пластинах кремния толщиной около 0,5 мм. В этом случае необходимо применение таких конвертеров как сцинтилляторы — для более полного преобразования энергии рентгеновских квантов в световое излучение с последующей регистрацией фотоприемными устройствами видимого диапазона.

В настоящее время хорошо известны формирователи изображения на приборах с зарядовой связью (ПЗС) [1]. Эти приборы изготавливаются по технологии с очень высокими требованиями и поэтому имеют высокую стоимость и ограниченное число производителей. В то же время развитие и распространение более доступной технологии КМОП ИС стимулирует создание нового класса преобразователей изображения на основе цифровых регистров [2, 3], которые способны конкурировать с аналогичными устройствами на ПЗС не только по цене, но и по ряду других параметров, в том числе и по радиационной стойкости, что важно при работе в составе аппаратуры для гамма-, рентгеновской интроскопии и др. Кроме того, использование твердотельных формирователей изображения для конвертированного светового излучения требует согласования размеров их элементарной ячейки с размерами ячейки конвертера, которые иногда составляют единицы или десятки миллиметров. Эта задача упрощается, если вместо ПЗС используется опрос ячеек цифровыми регистрами.

Дополнительным преимуществом таких систем является то, что организация опроса фоточувствитель-

ных элементов (ФЧЭ) осуществляется с помощью цифровых регистров, расположенных отдельно от ФЧЭ, при этом появляется возможность обработки сигнала внутри самой фотоприемной ячейки, т. к. в фоточувствительном элементе и рядом с ним можно размещать необходимые МОП-элементы преобразования и обработки сигнала для улучшения его параметров. В отношении таких ФЧЭ с описанными МОП-элементами употребляют термин “активная сенсорная ячейка” (АСЯ).

Использование технологии КМОП ИС расширяет также возможности интеграции фотоприемных элементов с электронными схемами обработки и усиления сигналов на одном кремниевом чипе, что является современной тенденцией при разработке подобных изделий.

В данной работе представлены линейные и матричные фоточувствительные приборы на основе массива фоточувствительных элементов (ячеек) и цифровых регистров, изготовленных по технологии КМОП ИС.

В разработанных интегральных микросхемах (ЛФП) SFD32 и SFD128 реализован принцип построения кремниевых многоэлементных фотоприемников с совмещением функций накопления сигнального заряда, считывания сигналов и превращения заряда в напряжение. Структурная схема ИС приведена на рис. 1, где  $InR$  — стартовый импульс цифрового регистра развертки;  $Q_A$  — выход аналогового сигнала;  $Qr$  — выходной импульс цифрового регистра развертки.

В данной конструкции реализована схема последовательного опроса фоточувствительных ячеек со считыванием их сигналов на общий предусилитель.

Разработка потребовала проведения расчета и исследования временных и зарядовых характеристик основных схемотехнических узлов аналоговой и цифровой

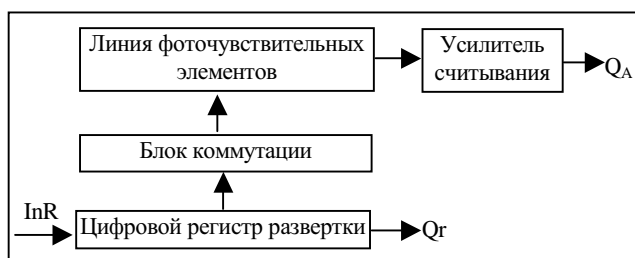


Рис.1. Структурная схема ИС SFD128 (SFD32)

Авторы благодарят сотрудников Института сцинтилляционных материалов НАНУ В. Д. Рыжикова и А. Д. Ополонина за помощь и предоставленные материалы.

частей микросхем, а также исследований, связанных с необходимостью совмещения технологии изготовления фотоприемников и технологии микроэлектронных схем обработки сигналов с учетом возможностей изготовления в рамках технологии КМОП ИС.

Разработанные ИС имеют соответственно 32 и 128 ФЧЭ. Например, микросхема SFD128 содержит в составе чипа линию из 128 фоточувствительных элементов, цифровой регистр развертки (имеющий не менее 128 каскадов) и выходной усилитель считывания. Длина кристаллов фотолинеек 25,4 мм, для SFD32 шаг ФЧЭ — 0,8 мм, их размеры — 0,6×2 мм, для SFD128 — шаг 0,2 мм, а размеры ФЧЭ 0,1×2 мм.

На рис. 2 показана электрическая схема активной сенсорной ячейки, включающей ФЧЭ. Каждая такая ячейка содержит фотодиод FD, МДП-транзистор M1, который предназначен для предустановки потенциала на фотодиоде FD перед каждым циклом регистрации фотозаряда путем периодической подачи на FD положительного напряжения Vd. При этом затворы транзисторов M1 линии ФЧЭ управляются выходными сигналами каскадов регистра развертки. МДП-транзистор M3 функционирует как устройство антиблуминга для фотодиода FD, т. е. позволяет устранить боковое растекание и инжекцию фотоносителей в полупроводниковую подложку при чрезмерной засветке ЛФП. Уровень срабатывания антиблуминга определяется значением напряжения Vab, подаваемого на затвор транзистора M3.

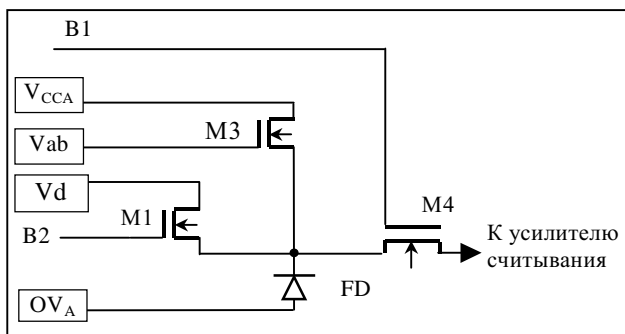


Рис. 2. Схема активной сенсорной ячейки с ФЧЭ

Детектирование фотогенерированного заряда в каждом ФЧЭ производится путем подключения фотодиода FD через транзистор M4 к входу усилителя считывания. Затворы транзисторов M4 линии ФЧЭ управляются выходными сигналами каскадов регистра развертки. В данной схеме детектирования устраняется «геометрический шум», связанный с пространственным разбросом параметров усилителя считывания, и минимизируется мощность, потребляемая устройством считывания. Коэффициент преобразования "заряд—напряжение" при этом определяется отношением

$$C_{FD} / (C_{FD} + C_{вх\ ус} + C_{вых\ ш}),$$

где  $C_{FD}$  — емкость фотодиода FD;  
 $C_{вх\ ус}$  — входная емкость усилителя считывания;  
 $C_{вых\ ш}$  — емкость выходной шины.

Цифровой регистр развертки предназначен для управления последовательным подключением фото-

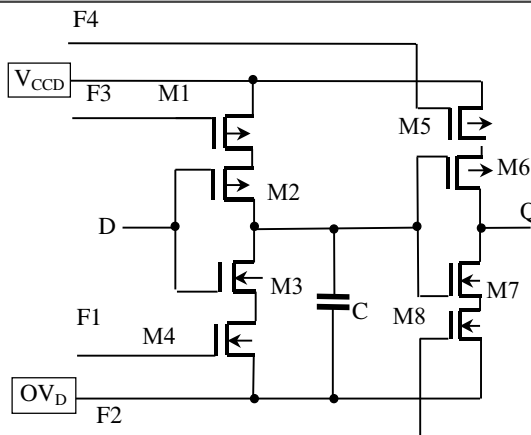


Рис. 3. Схема каскада цифрового регистра развертки

чувствительных элементов в процессе их предустановки, а также при считывании фотогенерированных в них зарядов. Регистр развертки построен по схеме динамического сдвигового регистра. Каждый каскад регистра состоит из двух динамических инверторов, между которыми включена фиксирующая емкость. Схема одного каскада цифрового регистра развертки приведена на рис. 3.

Управление регистром развертки производится посредством 4-фазных тактовых импульсов (рис. 4). Для согласования по входу регистра с уровнями TTL-сигналов в него введен согласующий входной каскад. На вход регистра развертки периодически подается входной импульсный сигнал логической «1». Передача этого импульса через регистр производит последовательное подключение фотодиодов линии ФЧЭ к источнику напряжения Vd для их предустановки или к входу усилителя считывания при детектировании фотогенерированных зарядов. Для контроля работы регистра, а также для синхронизации работы различных микросхем в составе одного модуля, предусмотрен выходной 128-й каскад регистра, в котором имеется дополнительный элемент с цифровым выходом Qr. Так как для предустановки фотодиода в J-м фотоэлементе линии используется сигнал с последующего (J+1)-го каскада регистра, то для управления предустановкой 128-го ФЧЭ в регистре развертки предусмотрен дополнительный 129-й каскад.

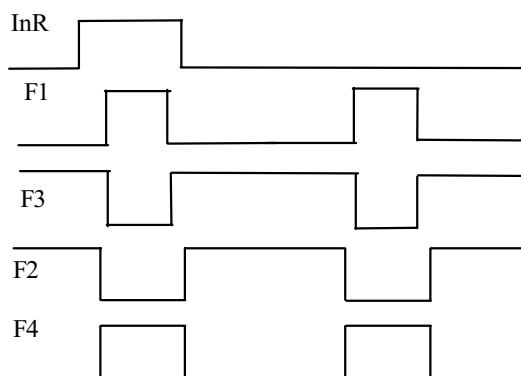


Рис. 4. Тактовые импульсы цифрового регистра развертки

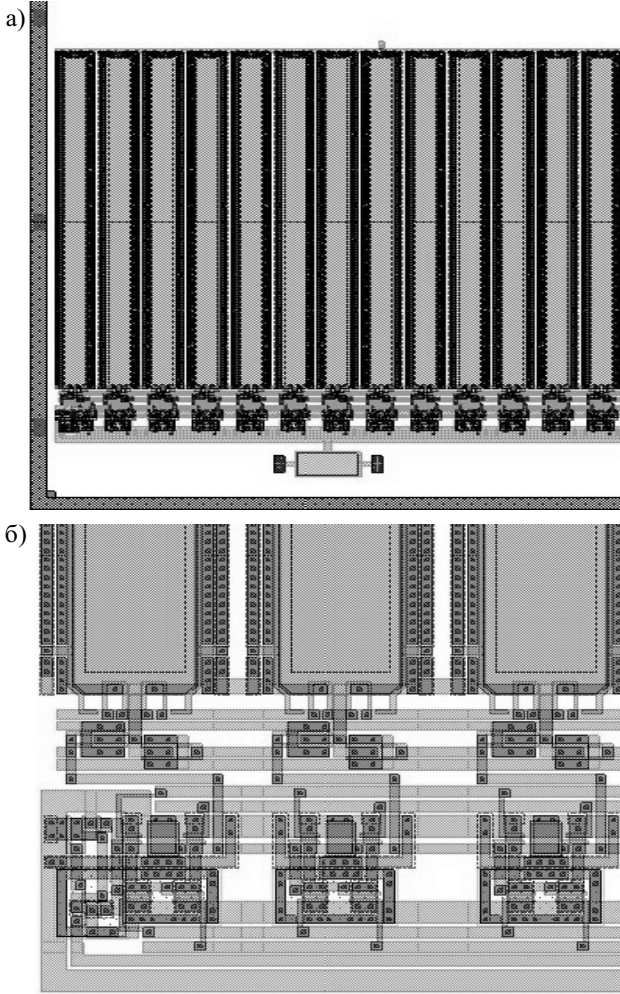


Рис 5. Фрагменты топологии кристалла ЛФП:  
а — ФЧЭ, б — регистр

Фрагменты топологии кристалла микросхемы ЛФП показаны на рис. 5, где видны фоточувствительные элементы и элементы коммутации и считывания сигналов.

Цифровой регистр развертки ИС SFD128 позволяет проводить опрос элементов с частотой до 10 МГц. Структурная схема сопряжения каскадов цифрового регистра и фоточувствительных элементов показана на рис. 6.

Изготовление микросхем SFD32 и SFD128 проводилось по технологии изготовления серийных КМОП ИС на стандартных пластинах кремния КДБ-12 диаметром 100 мм. Размеры кристалла ИС составляют 3,45×25,4 мм.

ИС смонтированы в специализированном 20-выводном корпусе типа DIP с двухрядным расположением выводов и базой 15 мм. Микросхема SFD128 в корпусе показана на рис. 7. Конструкция фотоподложки и корпуса дает возможность осуществить последовательную линейную стыковку двух и более микросхем в одну строку с необходимым общим количеством элементов (например 512).

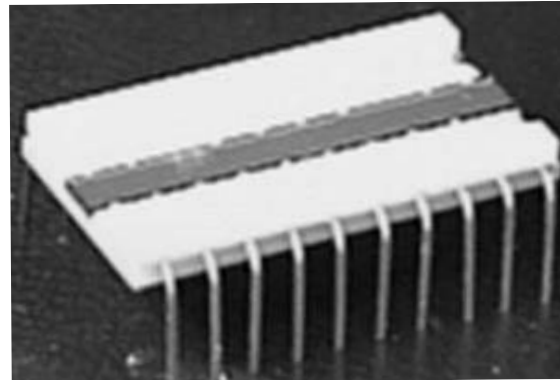


Рис. 7. Микросхема SFD128 в корпусе

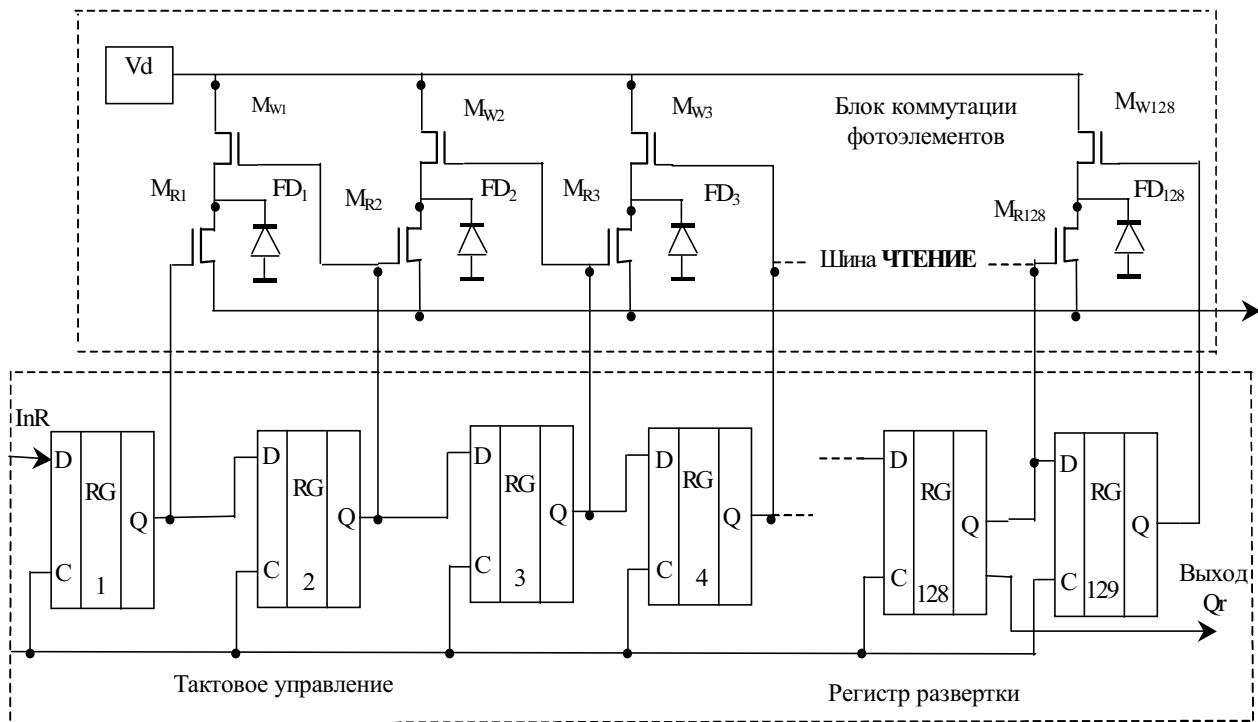


Рис. 6. Функциональная схема регистра развертки и блока коммутации

Выходной усилитель считывания, расположенный на кристалле ИС, предназначен для детектирования фотогенерированных зарядов, а также для согласования аналогового выхода микросхемы с внешними устройствами. Усилитель считывания построен по схеме операционного усилителя. Он обеспечивает согласование аналогового выхода ИС с емкостной нагрузкой не более 10 пФ. Амплитуда выходного сигнала SFD128 для максимального освещения составляет около 1,3 В, отношение сигнал/шум для ЛПФ более 50 ДБ.

Напряжение питания микросхемы 6,0—9,0 В.

Описанные фоточувствительные линейки используются в детекторах рентгеновского излучения в сочетании со сцинтилляторными линейками для преобразования энергии рентгеновского излучения в световое излучение, что позволяет реализовать формирователь рентгеновского изображения с повышенным разрешением (10—20 мкм) в интроскопии и томографии. В этом случае фотолинейки используются для регистрации вторичного оптического излучения сцинтилляторных кристаллов, высвечивающих люминесцентное излучение при взаимодействии с рентгеновским излучением. На рис. 8 показана зависимость выходного сигнала ЛПФ от мощности экспозиционной дозы рентгеновского излучения, падающего на сцинтилляторные элементы (толщина сцинтиллятора 0,6 мм).

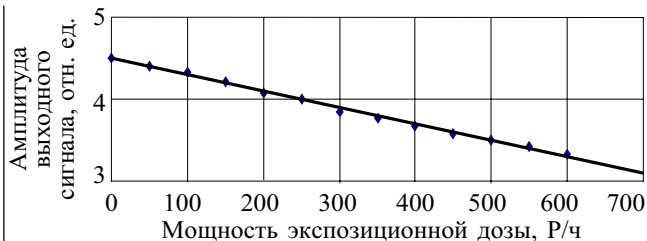


Рис. 8. Зависимость выходного сигнала ЛПФ от мощности рентгеновского излучения в импульсе ( $t=1\text{мс}$ )

На рис. 9 показано полученное с помощью описанного в статье ЛФП рентгеновское изображение тест-объекта, представляющего собой набор пар проволок различного диаметра (0,05; 0,063; 0,08; 0,1; 0,13; 0,16; 0,2; 0,25; 0,32; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8 мм), смонтированных на стеклотекстолите. Расстояние между проволочками каждой пары равно диаметру проволочки. Черная линия на рис. 9, а обозначает положение 41-го канала.

В варианте без сцинтиллятора фотолинейки могут быть использованы для регистрации излучения в видимой области с предельной длиной волны 1 мкм. Для расширения диапазона регистрируемого излучения в сторону УФ используется специальная конструкция фотоприемного элемента, позволяющая уменьшить поглощение УФ-излучения в пассивном поверхностном слое ФЧЭ.

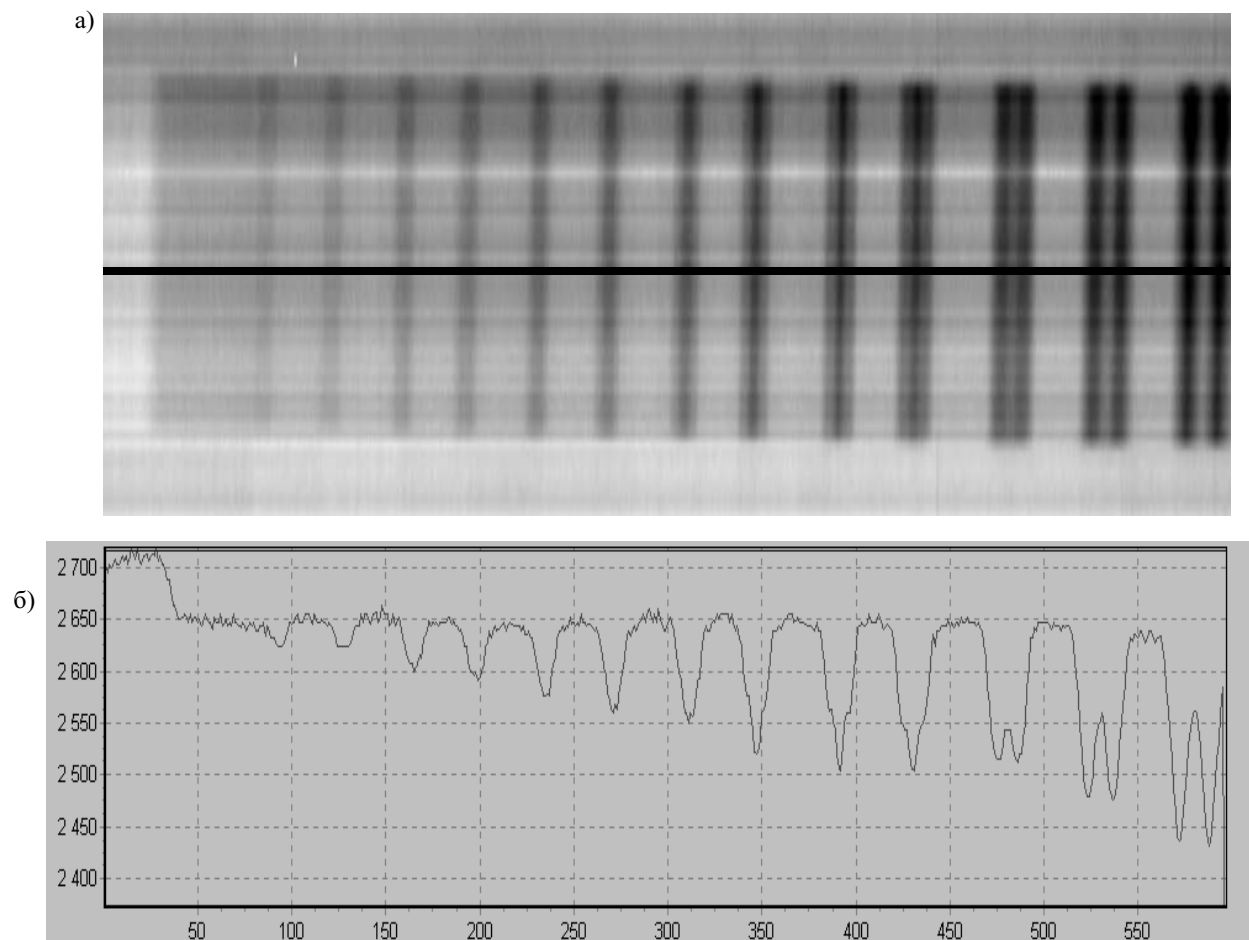


Рис. 9. Рентгеновское изображение тест-объекта (а) и зависимость амплитуды сигнала изображения от координаты вдоль черной линии на рентгеновском изображении тест-объекта (б)

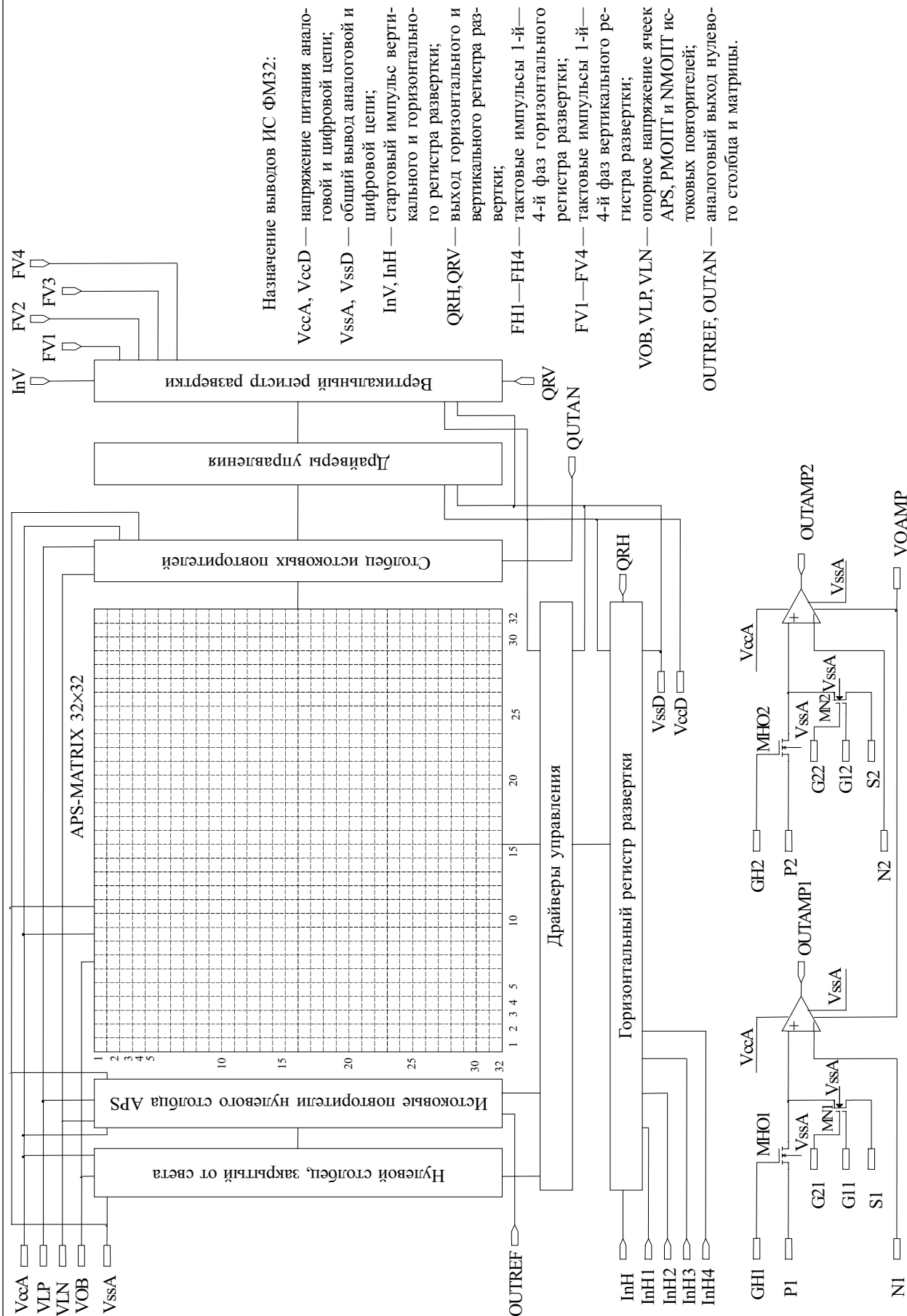


Рис. 10. Функциональная схема FM32

Описанный принцип опроса цифровыми регистрами позволяет также реализовать матричные формирователи изображения, используя горизонтальный и вертикальный регистры. Функциональная схема подобного матричного формирователя в виде тестовой матрицы 32×32 элемента показана на рис. 10.

Аналогичная конструкция реализована для построения матрицы 128×128 элементов. На основе активных сенсорных ячеек спроектирована КМОП ИС матричного преобразователя изображения XFM128, предназначенного для регистрации вторичного оптического излучения сцинтилляторных кристаллов, высвечивающих люминесцентное излучение при взаимодействии с рентгеновским излучением. Преобразователь изображения XFM128 содержит на кремниевом чипе размерами 25,4×25,4 мм матричный массив активных сенсорных ячеек в формате 128×128 и схемы электронного обрамления.

**Выводы**

1. Разработана конструкция КМОП интегральной микросхемы линейного фоточувствительного прибора

на основе активных сенсорных ячеек и цифровых регистров опроса.

2. Результаты измерений и исследований ЛФП позволяют сделать вывод о возможности их использования в формирователях изображения рентгеновского излучения на основе сцинтилляторов.

3. Предложена функциональная схема матричного фоточувствительного прибора на основе активных сенсорных ячеек и цифровых считывающих регистров и разработана конструкция КМОП интегральной микросхемы матричного фоточувствительного прибора в формате 128×128 со схемами электронного обрамления.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Секен К., Томпсет М. Приборы с переносом заряда.— М.: Мир, 1978.
2. Wong H.-S. Technology and device scaling considerations for CMOS imagers // IEEE Trans. Electron Devices.— 1996.— Vol. 43, N 12.— P. 2131—2142.
3. Mendis S. K., Kemeny S. E., Gee R. C. et al. CMOS active pixel image sensor for integrated imaging systems // IEEE J. of Solid State Circuits.— 1997.— Vol. 32, N 2.— P. 187—197.

**НОВЫЕ КНИГИ**

НОВЫЕ КНИГИ

**Казеннов Г. Г. Основы проектирования интегральных схем и систем.— М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005.— 295 с.: ил.**

В книге рассматриваются вопросы, связанные с методикой проектирования интегральных схем и систем, в том числе СБИС и систем на кристалле (SoC). Акцентируется внимание на основных этапах процесса проектирования (системный, микросхемный, регистровый, логический, схемотехнический, топологический, компонентный).

Приводятся сведения о средствах автоматизированного проектирования, а также о применении для этих целей систем искусственного интеллекта.

Для студентов вузов, специализирующихся в области электроники и изучающих дисциплины, связанные с проектированием интегральных схем и систем. Книга также может быть полезна разработчикам микроэлектронной аппаратуры.

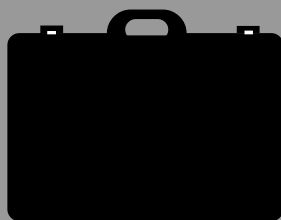
**Швец В. А. Одноплатные микроконтроллеры. Проектирование и применение.— М.: МК-Пресс, 2005, 304 с.**

Книга посвящена вопросам комплексного проектирования одноплатных микроконтроллеров для информационных и управляющих систем, построенных на универсальных микропроцессорах x86 и микроконтроллерах семейства x51. Подробно рассматриваются вопросы проектирования узлов одноплатных микроконтроллеров, программного обеспечения, применение микропроцессоров в цифровой обработке информации и измерительных устройствах.



в портфеле редакции

- Физическая модель акустооптического процессора цифровой обработки сигналов. (Украина, г. Донецк)
- Исследование элементной базы микрофототерминала. (Узбекистан, г. Ташкент)
- Исследование характеристик импульсных сигналов на основе базисов Хаара. (Украина, г. Киев)
- О влиянии температуры спекания на эксплуатационные характеристики влагочувствительной алюмомагниево-керамики. (Украина, г. Львов, Дрогобыч)
- Помехоподавляющие магнитопроводы из микропровода в стеклянной изоляции. (Молдова, г. Кишинев)
- Измерение рентгеновского излучения сенсорами на основе CdZnTe. (Украина, г. Харьков)
- Статистические характеристики интенсивности мешающих сигналов в безэховой камере туннельного типа. (Украина, г. Одесса)



- Использование сети электропитания для построения информационных систем. (Украина, г. Киев)
- Моделирование термоэлектрического генератора с низкотемпературным источником тепла. (Украина, г. Черновцы)
- Измерение влияния магнитного поля на термоэдс в микро- и нанополупроводниковых пленках без создания градиента температур. (Россия, г. Волгоград)

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

в портфеле редакции

Д. ф.-м. н. В. В. ГРИГОРЬЯНЦ, А. П. ДОЛГОВ,  
Л. Ю. КОЧМАРЁВ, к. т. н. И. П. ШИЛОВ

Россия, г. Фрязино, ФО Института радиотехники и  
электроники  
E-mail: ipshilov@mtu-net.ru

Дата поступления в редакцию  
27.09 2005 г.

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

## СВЧ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ СТРУКТУР ДЛЯ ВЫСОКОАПЕРТУРНЫХ ПЛАНАРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

*Представлены результаты разработки технологии и исследования оптических характеристик высокоапертурных ПОВ на основе  $\text{SiO}_2\text{-F|SiO}_2\text{|SiO}_2\text{-F}$ -структур, формируемых в плазме СВЧ-разряда.*

Планарные оптические волноводы (ПОВ) на кремниевых и кварцевых подложках широко применяются в МОEMS-технологиях, интегрально-оптических датчиках, в компонентах оптической связи, в частности в пассивных и активных оптических разветвителях [1, 2].

В большинстве случаев для формирования ПОВ используются методы парофазного химического осаждения (CVD), осаждения пламенным гидролизом (FHD), ВЧ-плазменным химическим парофазным осаждением (PECVD). При этом волноводные структуры базируются преимущественно на  $\text{SiO}_2$ -слоях отражающей оболочки и слоях сердцевины из нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) или оксинитрида кремния ( $\text{SiO}_x\text{N}_y$ ), а также из легированного кварцевого стекла ( $\text{SiO}_2\cdot\text{GeO}_2$ ). Однако при формировании волноводных слоев перечисленными методами возникают значительные внутренние напряжения. Это не позволяет создавать волноводные структуры с достаточно высокой апертурой (более 0,25) и с поперечными размерами волноводной области, обеспечивающими эффективное согласование со стандартными многомодовыми волокнами с диаметром сердцевины 50 и 100 мкм.

В настоящей работе представлены результаты разработки технологии и исследования оптических характеристик высокоапертурных ПОВ на основе  $\text{SiO}_2\text{-F|SiO}_2\text{|SiO}_2\text{-F}$ -структур, формируемых в плазме СВЧ-разряда пониженного давления.

### Экспериментальная установка

Формирование ПОВ производилось путем осаждения слоев чистого и легированного фтором  $\text{SiO}_2$  на подложки из кварцевого стекла размерами  $60\times 10\times 1$  мм в плазмохимическом реакторе (кварцевая труба с внутренним диаметром до 24 мм) с помощью опытной СВЧ-плазмохимической установки разработки ФИРЭ РАН. Плазмохимический реактор (ПХР) с подложками помещен в электрическую печь сопротивления; соосно с ПХР в центре печи расположен СВЧ-плазмотрон волноводного типа, соединенный волноводным трактом с СВЧ-генератором (мощность 5 кВт, частота 2,45 ГГц). В ПХР при воздействии СВЧ-энер-

гии на газовую среду (аргон) возбуждается локальное плазменное образование. С помощью механизма перемещения ПХР совершает вдоль СВЧ-разряда (СВЧР) возвратно-поступательные перемещения, в результате чего после каждого прохода на подложку осаждается тонкая прозрачная пленка стекла толщиной 0,1—0,5 мкм.

Известно, что для эффективного образования в плазме газового разряда свободных радикалов, ответственных за проведение требуемых плазмохимических реакций на поверхности подложки с целью получения нужного продукта, необходимо, чтобы температура электронов в разряде  $T_e$  была существенно выше газовой  $T_g$ . Отношение  $T_e/T_g$  почти линейно зависит от параметра  $E/P$  ( $E$  — напряженность электрического поля,  $P$  — давление газа), который определяет как свойства плазмы, так и скорости протекания плазмохимических реакций. Основная физическая проблема сводится, таким образом, к созданию в СВЧР максимально возможной напряженности электрического поля при рабочих давлениях газа 1—10 Торр.

Для повышения эффективности процесса плазмохимического осаждения кварцевого стекла, легированного фтором, нами предлагается в качестве СВЧ-плазмотрона использование устройства возбуждения СВЧР на волне  $\text{H}_{10}$ , которое представляет собой короткозамкнутый (КЗ) отрезок волновода сечением  $72\times 34$  мм (или  $72\times 20$  мм) с КЗ-поршнем (КЗП) и введенной в него опорной кварцевой трубой (ОКТ) нормально к широкой стенке. Вне волновода ОКТ окружена металлическим экраном.

Структура электрического поля вдоль широкой стенки волновода  $a$  такова, что на оси наблюдается максимум электрического поля, а при выполнении соотношения  $a/2r > 5$  ( $2r$  — внутренний диаметр ОКТ) образуется квазиоднородная в поперечном сечении ОКТ СВЧ-плазма, длина области существования которой определяется подводимой СВЧ-мощностью, давлением газа, размерами ОКТ и т. д.

Проведены расчеты для следующих экспериментальных условий:

- размеры ОКТ:  $2r=14$  мм (внутренний диаметр),  $2R=18$  мм (наружный диаметр);
- сечение прямоугольного волновода:  $a=72$  мм,  $b=34$  мм (узкая стенка);
- подводимая СВЧ-мощность  $W_{\text{под}}=600$  Вт;
- рабочая частота СВЧ-генератора 2,45 ГГц.

В результате расчетов получили:

$$E_V = 3,68 \cdot 10^4 \text{ В/м}, E_A = 1,2 \cdot 10^5 \text{ В/м},$$

где  $E_A$  и  $E_V$  — амплитуды СВЧ-поля в случаях, когда СВЧР соответственно существует и отсутствует в кварцевой трубе при постоянной подводимой СВЧ-мощности  $W_{\text{под}}$ .

В случае использования прямоугольного волновода размерами  $a=72$  мм,  $b=20$  мм при тех же экспериментальных условиях получим:

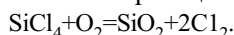
$$E_V = 4,8 \cdot 10^4 \text{ В/м}, E_A = 1,5 \cdot 10^5 \text{ В/м}.$$

Таким образом, сравнительный анализ основных электродинамических параметров устройств возбуждения СВЧР показывает, что СВЧ-плазмотрон волноводного типа на волне  $H_{10}$  с размером узкой стенки 20 мм, обеспечивая наибольшую величину напряженности электрического поля, наиболее перспективен для разработки ПОВ с повышенной числовой апертурой.

### Синтез кварцевого стекла в СВЧР

Плазмохимический синтез и формирование тонких слоев кварцевого стекла на подложках, размещенных в кварцевом ПХР, производится реакцией окисления  $\text{SiCl}_4$  при избытке кислорода. Инициирование данной реакции в плазме СВЧ-разряда пониженного давления осуществляется при взаимодействии с электронной компонентой и заключается в поэтапном отщеплении атомов хлора от радикалов  $\text{SiCl}_n$  ( $n=1, \dots, 4$ ) электронным ударом. Анализ функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) показывает, что в данном типе разряда средняя энергия электронов превышает 1 эВ, а энергия "горячих" электронов в высокоэнергетическом "хвосте" ФРЭЭ составляет 4—6 эВ. При этом, как указывают измерения ФРЭЭ, концентрация электронов с энергией  $\epsilon > 1$  эВ больше в СВЧ-разряде на смеси тетрахлорида кремния с кислородом, чем в чистом кислороде.

Впервые анализ кинетики процессов, происходящих в смеси  $\text{SiCl}_4 + \text{O}_2$  в СВЧР при осаждении пленок кварцевого стекла, проделан в [3]. Модель, которой описывался процесс, была, по-видимому, самой простой из возможных. Принималось, что область, занимаемая плазмой в резонаторе, имеет резкую границу; в потоке газа, пересекающем эту границу, сразу начинается реакция:



Возникающие при этом частицы  $\text{SiO}_2$ , не образуя кластеров, диффундируют к подложкам и при первом же столкновении закрепляются на них.

В работе была подобрана константа реакции, наилучшим образом описывающая получающийся в эксперименте профиль осаждения:

$$K = 4480 \text{ с}^{-1}.$$

Однако ценность полученной константы невелика, поскольку данная реакция ни в коей мере не может описывать многочисленные процессы с участием молекул, радикалов, электронов, ионов, возбужденных частиц, которые имеют место в плазме.

Нами была разработана модель процесса синтеза кварцевого стекла в плазме СВЧР, куда были включены следующие виды частиц:  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{SiCl}_3$ ,  $\text{SiCl}_2$ ,  $\text{SiCl}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}$ , электроны. Некоторые результаты расчетов в виде концентрационных зависимостей ( $Y$ ) от времени ( $t$ ) даны на **рис. 1** (здесь обозначение

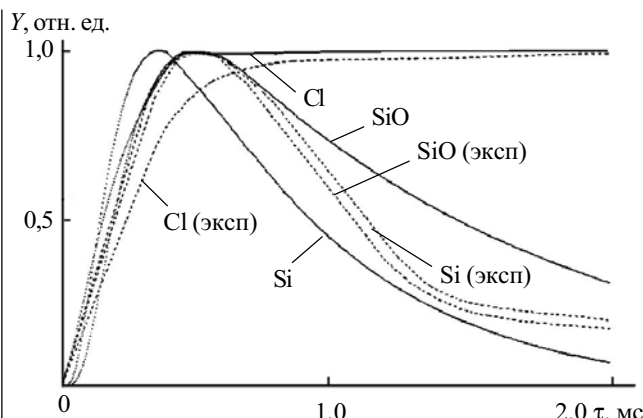


Рис. 1. Концентрационные зависимости от времени для  $\text{SiO}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Cl}$

"эксп" означает "экспериментальный"). Из рисунка видно, что наиболее долгоживущими в плазме СВЧР являются такие компоненты как  $\text{SiO}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Cl}$  ( $\tau > 1$  мс). Время реакции для тетрахлорида кремния составляет около  $10^{-4}$  с, т. е. этот компонент, попав в зону СВЧР, практически моментально разваливается.

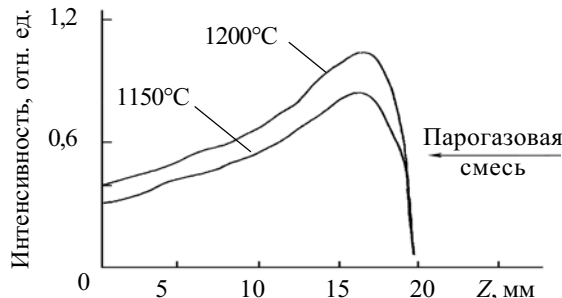


Рис. 2. Продольное распределение интенсивности линии  $\text{SiO}$  (425 нм) по длине СВЧР при различных температурах стенки опорной трубки ( $Z=0$  — центр СВЧР)

Преобразование  $\text{SiCl}_4$  в  $\text{SiO}$  и адсорбция последнего стенками опорной кварцевой трубки в основном завершается на длине 3—4 см СВЧР. Это подтверждается измерениями распределения интенсивности эмиссионной полосы  $\text{SiO}$  на длине волны 425 нм вдоль оси разряда (**рис. 2**). В спектре излучения отсутствуют полосы  $\text{SiO}_2$ , что свидетельствует о гетерогенном механизме синтеза кварцевого стекла [4]. В дальнейшем адсорбированные молекулы монооксида доокисляются на поверхности подложек до  $\text{SiO}_2$ .

### Экспериментальные результаты

На начальной стадии отработки методики формирования высокоапертурных  $\text{SiO}_2\text{-F/SiO}_2\text{/SiO}_2\text{-F}$  ПОВ-структур нами изучался процесс осаждения чистого кварцевого стекла в статическом режиме (т. е. без перемещения ПХР относительно плазмотрона) с целью определения профиля осаждаемых слоев и нахождения его максимума. На **рис. 3** представлен экспериментальный профиль осаждения  $\text{SiO}_2$ .

Как видно из рисунка, максимум осаждаемого слоя находится в самом начале плазменного сгустка, что объясняется высокой скоростью диссоциации  $\text{SiCl}_4$ . Характер экспериментального профиля осаждения во многом совпадает со спектральными исследованиями распределения интенсивности линии  $\text{SiO}$

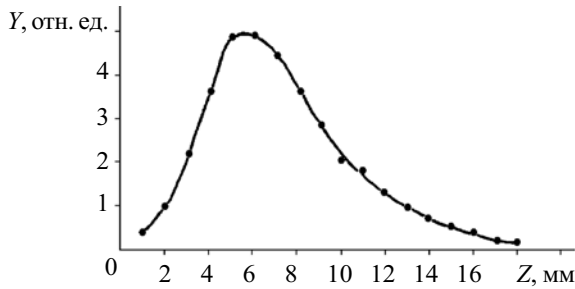


Рис. 3. Профиль осаждения  $\text{SiO}_2$  в статическом режиме СВЧ

вдоль оси опорной трубки (рис. 2). При перемещении ПХР относительно плазматрона осуществлялся процесс гетерогенного осаждения оптически прозрачных слоев чистого кварцевого стекла с достаточно равномерным (не хуже 5%) профилем осаждения по длине подложки.

Добавление к исходной газовой смеси фторагента (что необходимо для легирования кварцевого стекла фтором при формировании фторсиликатной светоотражающей оболочки) приводит к тому, что за транспорт кремния в газовой фазе уже будут отвечать молекулы  $\text{SiF}_4$  или радикалы  $\text{SiF}_m$  ( $m < 4$ ), а в конденсированной фазе будут, по всей видимости, образовываться молекулы типа  $\text{SiO}_{1,5}\text{F}$ , в которых тетраэдрически расположенный атом кремния связан с одним атомом фтора и тремя атомами кислорода.

Для оптимизации процесса осаждения фторсиликатного стекла нами были апробированы различные фторреагенты ( $\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}$ ,  $\text{SF}_6$  и т. д.). Самым эффективным фторагентом оказалась фреон-218 ( $\text{C}_3\text{F}_8$ ). Использование фреона-218 обеспечивает достижение числовой апертуры вплоть до 0,28 при использовании волноводного плазматрона  $\text{H}_{10}$  с шириной узкой стенки 20 мм. На наш взгляд, для получения высокого уровня легирования кварцевого стекла фтором необходимо добиваться совпадения концентрационного максимума F в газовой фазе с максимумом профиля осаждения кварцевого стекла, который локализован в самом начале разряда. Поскольку константа скорости диссоциации  $k_{\text{дис}}$  фторсодержащих реагентов ниже, чем у тетраоксида кремния, необходимо уменьшать время диссоциации фторагентов  $\tau$ , увеличивая удельный энерговыход в СВЧ-разряде и тем самым повышая концентрацию электронов  $N_e$  ( $\tau \approx 1/k_{\text{дис}} N_e$ ). Эту задачу в значительной степени и помогает решить использование СВЧ-плазматрона волноводного типа с уменьшенным размером узкой стенки.

На рис. 4 представлено схематическое изображение структуры и микрофотография торцевого участка планарного оптического волновода. Волновод включает в себя волноводный слой чистого  $\text{SiO}_2$  (толщина 100 мкм, показатель преломления 1,456), два фторсиликатных отражающих слоя (толщина 15 мкм, показатель преломления 1,425) и буферный слой  $\text{SiO}_2$  толщиной 5 мкм.

Для измерения оптических характеристик полученных структур из сформированных планарных волноводов были изготовлены образцы с полосковой геометрией с размерами  $40 \times 2 \times 1$  мм. На боковые стенки волноводов наносился слой светоотражающего покрытия, в качестве которого использовался кремний-органический компаунд типа СИЭЛ с показателем пре-

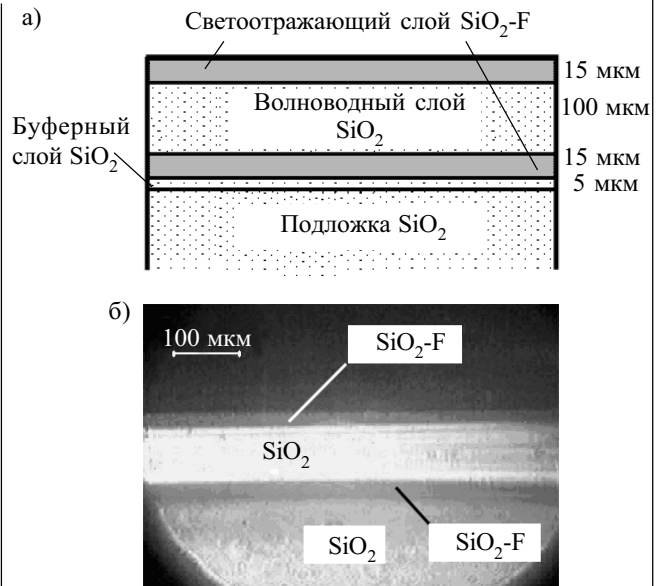


Рис. 4. Структура (а) и микрофотография (б) торцевого участка планарного оптического волновода

ломления 1,421. Коэффициент затухания изготовленных образцов составлял менее 0,005 дБ/см при числовой апертуре (измеренной по уровню 0,1)  $NA=0,26$ .

Основной характеристикой оптического волновода, определяющей возможность его использования в качестве смесительного элемента в оптических разветвителях, является степень равномерности распределения оптической мощности на выходном торце вдоль световедущего слоя при вводе излучения из волоконного световода. В общем случае вид распределения зависит от длины и оптической однородности волновода, а также от места ввода излучения.

На рис. 5 представлены микрофотография торцевого участка полоскового волновода и эксперимен-

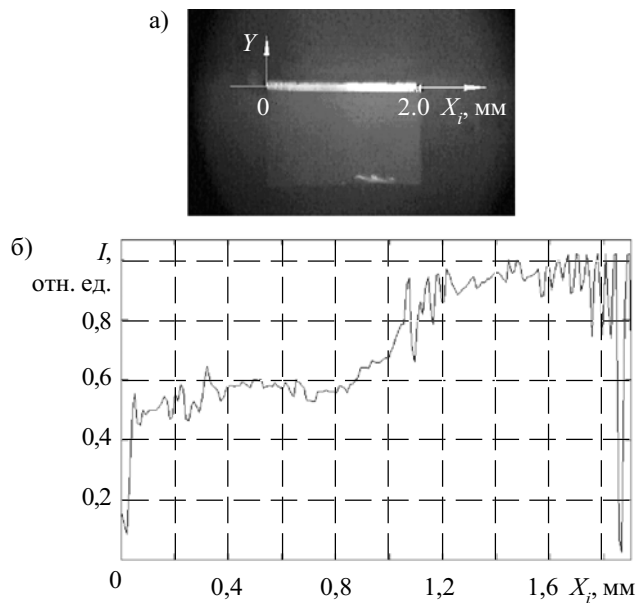


Рис. 5. Микрофотография торцевого участка (а) и распределение интенсивности  $I$  оптического излучения на выходном торце (б) полоскового волновода при вводе излучения в крайнюю область волноводного слоя

тальная кривая распределения интенсивности излучения вдоль оси  $X$  волноводной области, полученная при вводе в краевую ( $X_i=1,8$  мм) область волноводного слоя излучения с длиной волны 0,85 мкм. Неравномерность распределения интенсивности оптического излучения на выходе волновода составляла не более 50%. Наблюдаемая в краевой зоне осцилляция кривой объясняется эффектом многолучевой интерференции в полосковой структуре. Четкость интерференционной картины обусловлена как достаточным качеством оптической обработки боковых поверхностей волновода, так и высокой однородностью структуры полученных образцов.

\*\*\*

На основе полосковых волноводов были изготовлены разветвители с матрицей передачи  $16 \times 16$ , предназначенные для распределения мощности в волоконно-оптических системах информационного обмена. Структура разветвителя образуется путем соединения полоскового волновода с торцевыми участками уложенных в ряд оптических волокон с диаметром сердцевины 100 мкм и числовой апертурой 0,22.

Измеренное значение вносимых потерь изготовленного образца разветвителя составило не более 5 дБ при неравномерности распределения оптической мощности  $\pm 1,5$  дБ, что соответствует требованиям, предъявляемым к разветвителям современными волоконно-оптическими системами передачи информации.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Житковский В. Д., Ключник Н. Т., Яковлев М. Я. Многоплоскостные разветвители на основе слоевых структур из стекла для волоконно-оптических информационных систем // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания.— 2002.— № 1–2.— С. 68—73.
2. Ключник Н. Т., Гурьянов А. В., Белянин В. Ф. и др. Формирование оптической волноводной структуры, включающей область из нанокompозитного материала / Нанотехнологии и фотонные кристаллы. Мат-лы I Межрегион. семинара.— Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003.— С. 50—59.
3. Welling F. // J. Appl. Phys.— 1985.— Vol. 57, N 9.— P. 4441—4446.
4. Bauch H., Krause D., Paquet V. et al. Properties of PICVD-fibers with pure SiO<sub>2</sub>-core: the influence of the preform collapse process // J. Opt. Commun.— 1987.— Vol. 8, N 4.— P. 191—197.

*К. ф.-м. н. А. Г. БОРИСЕНКО, Б. П. ПОЛОЗОВ,  
к. ф.-м. н. О. А. ФЕДОРОВИЧ, к. ф.-м. н. Н. С. БОЛТОВЕЦ,  
В. Н. ИВАНОВ, к. т. н. Ю. Н. СВЕШНИКОВ*

Украина, г. Киев, Ин-т ядерных исследований, НИИ «Орион»;  
Россия, г. Москва, «Элма-малахит»  
E-mail: boris@kinr.kiev.ua, interdep@kinr.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
05.07 2005 г.

Оппонент *к. ф.-м. н. С. В. ГРУШЕЦКИЙ*  
(БГУИР, г. Минск)

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР НИТРИДА ГАЛЛИЯ

*Описаны особенности технологии травления сложных наноструктур, содержащих эпитаксиальные слои нитрида галлия, нанесенные на подложку из сапфира. Изготовлены высокотемпературные датчики Холла.*

Нитрид галлия — один из новых полупроводников, привлекающий к себе в последнее время все большее внимание со стороны исследователей и технологов. Это связано с наличием у него прямых зона-зона-переходов, ширина большой запрещенной зоны которых — 3,51 эВ для структуры вюрцита и 3,3 эВ для кубической структуры [1]. Благодаря этой особенности эпитаксиальные структуры нитрида галлия являются перспективными для применения в высокотемпературной оптоэлектронике, СВЧ-микротехнике, лазерной технике [2]. В частности, они используются для разработки высокоэффективных лазеров с диапазоном излучения от ультрафиолетовой до зеленой областей спектра.

Нитрид галлия используется также для изготовления других источников видимого излучения со спек-

тром, близким к солнечному, которые имеют в данный момент коэффициент преобразования электрической энергии в световое излучение >40% с планируемым КПД до 60% [3]. Представляет интерес и разработка высокотемпературных датчиков Холла для измерений магнитных полей, которые могут работать при температурах до 600°C.

Разработка эффективной технологии травления этого нового полупроводникового материала относится к числу актуальных задач. В настоящей работе описаны особенности технологии травления сложных наноструктур, содержащих эпитаксиальные слои нитрида галлия, нанесенные на подложку из сапфира.

Исследования проводились при разработке высокотемпературных датчиков Холла. Использовались сложные наноструктурные слои, содержащие эпитаксиальные слои нитрида галлия. Эпитаксиальные структуры, которые подвергались плазмохимическому травлению, были последовательно нанесены на подложку из сапфира и содержали следующие нанослои:  $n$ -структура нитрида галлия ( $n$ -GaN), титан, алюминий, борид титана ( $TiB_2$ ), золото или  $n$ -структура нитрида галлия ( $n$ -GaN), титан, алюминий, титан,

золото. На оже-профилях структуры контактной системы до и после отжига ее при температуре 700°C в течение 30 с можно не только проследить состав отдельных слоев, но и оценить их толщины [4].

В работе [5] для травления нитрида галлия применялись  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  и их смеси с азотом. Травление происходило при индукционном разряде с максимальной мощностью высокочастотного генератора (13,56 МГц) — 5 кВт. Максимальные скорости травления GaN при этом составили 250 Å/мин.

В нашем случае обработка образцов проводилась в плазмохимическом реакторе (ПХР) с замкнутым дрейфом электронов [6]. Химически активная плазма образовывалась в ПХР при высокочастотном разряде с частотой 13,56 МГц в скрещенном (по отношению к электрическому) и управляемом магнитном поле. Использование ВЧ-разряда в поперечном магнитном поле увеличивает степень диссоциации молекул рабочих газов и степень ионизации атомов, что приводит к увеличению плотности плазмы и радикалов и, соответственно, скоростей травления обрабатываемых материалов. Особенностью данного ПХР является возможность регулирования энергии химически активных ионов от 20 до 700 эВ с помощью управляемых магнитных полей (при неизменных других параметрах разряда).

Магнитное поле создавалось тремя катушками. Верхняя и нижняя катушки с регулировкой тока включены последовательно и синфазно. Средняя катушка включена отдельно, а величину и направление тока в ней можно было также менять. Поэтому в исследованиях изменялась не только напряженность магнитного поля, но и его конфигурация [7], что позволяло регулировать энергию ионов в широких пределах, как отмечено выше. Это дает возможность проводить плазмохимическое травление при низких энергиях ионов без радиационных повреждений поверхностных слоев, а также распыление обрабатываемых материалов.

При обработке эпитаксиальных слоев нитрида галлия, выращенных на сапфировых подложках, возникает несколько проблем. Во-первых, нитрид галлия при травлении в химически активной плазме, образующейся в реакторе при ВЧ-разряде в парах четыреххлористого углерода, может образовывать на поверхности обрабатываемого образца как соединение  $\text{GaCl}_3$  с температурой испарения 201,3°C, так и  $\text{GaCl}_2$  с температурой испарения 535°C [8, с. 52, 53]. Для удаления этих соединений с поверхности обрабатываемого материала нужен существенный нагрев подложки или ее достаточно мощная ионная стимуляция, необходимая для улучшения процесса десорбции продуктов реакции GaN с радикалами, атомами и ионами, возникающими в ПХР при ВЧ-разряде в парах  $\text{CCl}_4$ . Использовать для травления GaN фторсодержащие соединения нецелесообразно, т. к. образующийся на поверхности  $\text{GaF}_3$  имеет температуру испарения 1000°C [8, там же], а при таких высоких температурах удаление продуктов реакции с поверхности нитрида галлия без повреждения никелевой маски толщиной 0,5—1,0 мкм становится проблематичным.

Вторая, более существенная проблема — это необходимость снятия в процессе травления с поверхности образца положительного электрического заряда, который препятствует попаданию ионов хлора на поверхность, что приводит к прекращению процесса травления.

Для снятия поверхностного заряда применялась специальная схема одновременного подключения к ПХР двух высокочастотных генераторов — основного с частотой 13,56 МГц и дополнительного с частотой 440 кГц. Первый генератор создавал химически активную плазму, состоящую из ионов, электронов и радикалов. Второй генератор с частотой 440 кГц позволял снимать заряд с поверхности нитрида галлия. Влияние одного генератора на другой в процессе совместной работы сводилось к минимуму специальными разработанными и изготовленными фильтрами.

Исследования по травлению сложных эпитаксиальных слоев проводились в три этапа (см. таблицу). Первый этап *А* был посвящен исследованиям возможности травления нитрида галлия и отработке приемлемой технологии его травления. Второй этап *Б* был направлен на разработку технологии получения простых структур, содержащих нитрид галлия, с применением маски из никелевой пленки толщиной ≈0,5 мкм. И, наконец, третий этап *В* — исследование возможности травления сложных эпитаксиальных наноструктур, содержащих нитрид галлия. Каждый из этих этапов исследований требовал определенных изменений в технологической цепочке, т. к. приходилось решать совершенно разные задачи и травить другие технологические слои.

В качестве рабочих газов при травлении использовались четыреххлористый углерод, а также его смеси с кислородом или с аргоном в разных соотношениях. Давление рабочего газа в реакторе варьировалось в пределах  $(1...7) \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. Расходы газов измерялись при помощи двух жидкостных расходомеров с одинаковыми параметрами. Разность высот уровней вакуумного масла в расходомерах измерялась в мм, а отношение высот к их сумме дает процентное отношение потока газов в ПХР.

Энергия ионов регулировалась с помощью управляемых магнитных полей от 80 до 500 эВ. Мощность основного генератора  $P_{\text{ген}}$  (13,56 МГц) в двух первых сериях исследований не превышала 1 кВт при суммарном токе  $I_{\text{разр}}$  в разряде 8 А и токе  $I_{\text{доп}}$ , создаваемом дополнительным генератором (440 кГц), не более 4,5 А. При низких энергиях ионов (80 эВ) в разряде в  $\text{CCl}_4$  процесс травления GaN проходит очень медленно и поверхность образца при этом становится черной (загрязненной) (табл., *А*). Видимо, это связано с осаждением углерода или полимерных пленок на обрабатываемой поверхности.

На масс-спектрограммах, полученных в процессе травления (см. рисунок), наблюдаются пики  $\text{CCl}_3^+$ ,  $\text{CCl}_2^+$ ,  $\text{CCl}^+$ ,  $\text{Cl}^+$ ,  $\text{C}^+$  и другие. Это, с одной стороны, свидетельствует о высокой эффективности работы ПХР при диссоциации исходного рабочего газа, а с другой — показывает наличие атомов углерода, которые могут сорбироваться на поверхности обрабатываемых структур. При расшивке масс-спек-

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ**

*Режимы травления образцов на сапфировой подложке:*

*A — обработка технологии травления GaN; Б — травление образцов GaN; В — травление эпитаксиальных слоев GaN*

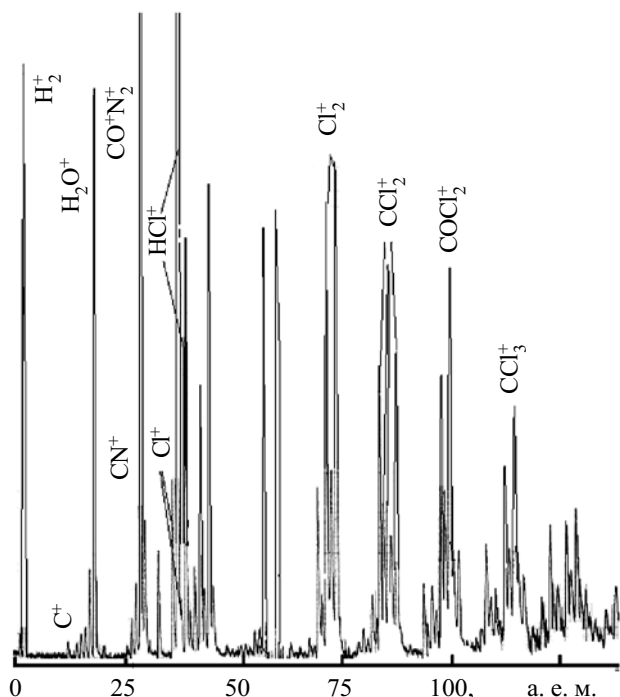
| Номер образца | Рабочие газы   |                         | Давление газа в реакторе, мм рт. ст. | $P_{\text{тен}}, \text{Вг}$<br>(13,65 МПа) | $I_{\text{доп}}, \text{А}$<br>(440 кПа) | $I_{\text{разр}}, \text{А}$ | Напряжение смещения, В | Время травления, мин | Скорость травления, Å/мин | Примечание   |
|---------------|----------------|-------------------------|--------------------------------------|--|---|-----------------------------|------------------------|----------------------|---------------------------|--|
|               | $\text{CCl}_4$ | $\text{O}_2, \text{Ar}$ |                                      |  |   |                             |                        |                      |                           |  |
| <b>A</b>      |                |                         |                                      |  |   |                             |                        |                      |                           |  |
| 1             | 130            | —                       | 0,065                                | 800  | 2,0                                     | 6,0                         | 150                    | 15                   | ...                       | Недотравлен  |
| 1             | 130            | —                       | 0,067                                | 900  | 2,4                                     | 6,5                         | 220                    | 30                   | ...                       | Распыляется маска  |
| 2             | 130            | —                       | 0,067                                | 800  | 2,0                                     | 6,0                         | 150                    | 55                   | ...                       | Недотравлен  |
| 2             | 80             | 50 ( $\text{O}_2$ )     | 0,067                                | 800  | 2,0                                     | 6,0                         | 150                    | 7+3                  | ...                       | 3 мин только в $\text{O}_2$  |
| 3             | 50             | 15 ( $\text{O}_2$ )     | 0,040                                | 900  | 3,0                                     | 7,0                         | 100                    | 20                   | ...                       | Поверхность загрязнена   |
| 3             | —              | 90 ( $\text{O}_2$ )     | 0,035                                | 900  | 3,2                                     | 8,0                         | 150                    | 5                    | ...                       | Поверхность очистилась   |
| 3             | 50             | 15 ( $\text{O}_2$ )     | 0,040                                | 900  | 3,0                                     | 8,0                         | 150                    | 20                   | ...                       | Поверхность загрязнена   |
| 3             | —              | 50 ( $\text{O}_2$ )     | 0,040                                | 900  | 3,0                                     | 8,0                         | 150                    | 10                   | ...                       | Поверхность очистилась   |
| 3             | 50             | 15 ( $\text{O}_2$ )     | 0,040                                | 900  | 3,2                                     | 8,0                         | 150                    | 30                   | ...                       | Поверхность загрязнена   |
| 3             | —              | 100 ( $\text{O}_2$ )    | 0,030                                | 800  | 3,6                                     | 7,5                         | 200                    | 22                   | ...                       | Остатки резиста  |
| 3             | —              | 100 ( $\text{O}_2$ )    | 0,035                                | 800  | 3,6                                     | 7,5                         | 200                    | 10                   | ...                       | Поверхность очистилась   |
| 4             | 50             | 15 ( $\text{O}_2$ )     | 0,040                                | 900  | 3,0                                     | 7,0                         | 100                    | 32                   | ...                       | Поверхность загрязнена   |
| 4             | —              | 90 ( $\text{O}_2$ )     | 0,040                                | 900  | 3,0                                     | 8,0                         | 150                    | 10                   | ...                       | Поверхность очистилась   |
| 4             | 60             | 20 ( $\text{O}_2$ )     | 0,042                                | 900  | 2,8                                     | 7,0                         | 150                    | 20                   | ...                       | Недотравлен  |
| 4             | 60             | 20 ( $\text{O}_2$ )     | 0,042                                | 900  | 2,8                                     | 7,0                         | 150                    | 5                    | ...                       | Протрав до подложки  |
| <b>Б</b>      |                |                         |                                      |  |   |                             |                        |                      |                           |  |
| 5             | 100            | —                       | 0,010                                | 1000                                       | 2,0                                     | 6,5                         | 200                    | 30                   | ...                       | Под микроскопом (М): травления нет   |
| 5             | 100            | —                       | 0,067                                | 1000                                       | 2,6                                     | 6,0                         | 300                    | 30                   | ≈400                      | М: глубина травления $\Delta=1,2$ мкм  |
| 5             | 125            | —                       | 0,042                                | 1000                                       | 4,4                                     | 8,5                         | 140                    | 30                   | ...                       | М: появились трещины   |
| 6             | 130            | —                       | 0,070                                | 1000                                       | 4,4                                     | 9,0                         | 80÷130                 | 40                   | ...                       | М: практически не травится   |
| 6             | 130            | —                       | 0,060                                | 1000                                       | 4,2                                     | 8,5                         | 80÷220                 | 30                   | ...                       | М: протрав почти полный  |
| 7             | 130            | 40 (Ar)                 | 0,067                                | 900  | 3,8                                     | 7,0                         | 400                    | 20                   | ...                       | М: весь Ni распылился  |
| 8             | 130            | 10 (Ar)                 | 0,048                                | 900  | 4,5                                     | 8,0                         | 250                    | 20                   | ≈400                      | М: $\Delta=1,2$ мкм  |
| 9             | 130            | 10 (Ar)                 | 0,067                                | 900  | 4,4                                     | 8,0                         | 250                    | 30                   | ≈670                      | Теплая вода. М: поверхность чистая, Ni цел, $\Delta=2$ мкм                     |
| <b>В</b>      |                |                         |                                      |  |   |                             |                        |                      |                           |  |
| 10            | 100            | 10 (Ar)                 | 0,067                                | 1000                                       | 3,8                                     | 7,5                         | 260                    | 40                   | 500                       | М: поверхность чистая, $\Delta=0,27$ мкм                                       |
| 11            | 120            | 20 (Ar)                 | 0,080                                | ...  | ...                                     | 12                          | 250                    | 20                   | 125                       | М: $\Delta=0,75$ мкм.  |
| 12            | 70             | 20 (Ar)                 | 0,090                                | ...  | ...                                     | 12                          | 240                    | 30                   | 250                       | М: $\Delta=0,75$ мкм   |
| 13            | 70             | 20 (Ar)                 | 0,075                                | ...  | ...                                     | 11                          | 260                    | 30                   | 250                       | $T_{\text{воды}} 50^\circ\text{C}$ , $\Delta=0,75$ мкм                         |
| 14            | 70             | 20 (Ar)                 | 0,055                                | ...  | ...                                     | 12                          | 240—260                | 70                   | ...                       | $T_{\text{воды}} 70^\circ\text{C}$ , снялся Ni                                 |
| 15            | 70             | 20 (Ar)                 | 0,075                                | ...  | ...                                     | 10                          | 200                    | 30                   | ...                       | $T_{\text{воды}} 55^\circ\text{C}$ , снялся Ni                                 |
| 16            | 70             | 20 (Ar)                 | 0,042                                | ...  | 4,5                                     | 10                          | 190                    | 25                   | 700                       | $T_{\text{воды}} 70^\circ\text{C}$ , Ni цел, $\Delta=1,5$ мкм                  |
|               |                |                         | 0,090                                | ...  | 3,2                                     | ...                         | ...                    | 10                   | 540                       | $T_{\text{воды}} 50^\circ\text{C}$ , $\Delta=1,5$ мкм, Ni распылился полностью |

ров следует учитывать, что хлор имеет два устойчивых изотопа — хлор с массой 35 (75,4%) и хлор с массой 37 (24,6%) [9]. Поэтому на масс-спектрах наблюдаются одинаковые соединения с разными массами. Например,  $\text{CCl}_3$  с массами 117, 119 и 121,  $\text{COCl}_2$  с массами 98, 100 и 102,  $\text{CCl}_2$  — 82, 84 и 86,  $\text{Cl}_2$  — 70, 72 и 74, Cl — 35, 37, HCl — 36, 38 и т. д.

Для устранения нежелательных образований (полимерных пленок), образующихся на поверхности образца после процесса травления GaN, использовался разряд в кислороде в течение 3—10 мин при энергиях ионов кислорода ≈150 эВ. В результате такой обработки поверхность образцов становилась чистой (табл., A): с поверхности удалялись также все ради-

калы и хлор, которые могли способствовать разрушению образцов при попадании на них влаги при дальнейшем хранении или работе с ними.

Для предотвращения образования полимерных пленок на поверхности образцов в процессе травления нитрида галлия при разряде в четыреххлористом углероде в реактор добавлялся кислород в соотношении 3:1. Предполагалось, что в результате сильно-экзотермической реакции соединения углерода с кислородом  $\text{C}+\text{O}=\text{CO}+11,11$  эВ или  $2\text{C}+\text{O}_2=2\text{CO}+17,1$  эВ будет образовываться летучее соединение CO, и поверхность, таким образом, не будет загрязняться. (Следует учитывать, что применение этой смеси может давать хорошие результаты при травлении нитрида



Масс-спектры продуктов диссоциации и продуктов химических реакций, происходящих в ПХР при высококачественном разряде в  $\text{CCl}_4 + \text{O}_2$

галлия, но при травлении титана, алюминия или, тем более, сапфира ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) добавка кислорода может полностью блокировать процесс травления.) Поверхность, полученная после травления, действительно несколько улучшалась (табл., А), но для выбора оптимального режима требуется дальнейшая отработка технологии.

Вместе с тем при работе ПХР на смеси газов  $\text{CCl}_4 + \text{O}_2$  на масс-спектрах наблюдается  $\text{SOCl}_2$  (фосген), который является очень токсичным и вредным для обслуживающего персонала. Поэтому для улучшения экологичности технологии и увеличения безопасности работы на ПХР была отработана технология травления эпитаксиальных слоев нитрида галлия без добавок кислорода.

С целью увеличения ионной стимуляции поверхности образца в камеру ПХР добавлялся аргон в количестве до 25% от объема основного рабочего газа, что также приводило к уменьшению полимерной пленки на поверхности образцов.

Увеличение энергий ионов до 400 эВ приводило к полному разрушению (распылению) никелевой маски уже при экспозициях, не превышающих 20 мин (табл., Б). Оптимальными оказались режимы обработки эпитаксиальных структур при энергиях ионов 200—260 эВ, при которых еще не происходило существенного распыления маски из никеля, но достаточно эффективно происходило травление структур, содержащих нитрид галлия, нанесенных на сапфировую подложку.

Как уже отмечалось выше, температура испарения возможных продуктов реакции GaN с хлором с поверхности образца составляет достаточно большие величины (200—535°C), поэтому наряду с полимерными пленками на поверхности образца мо-

гут, вероятно, находиться и продукты реакции хлора с нитридом галлия ( $\text{GaCl}_2$  и  $\text{GaCl}_3$ ). Для стимуляции их десорбции с обрабатываемой поверхности производился подогрев воды, используемой для охлаждения реактора.

Таким образом, при мощности основного генератора 1 кВт, суммарном токе в разряде 8 А, токе дополнительного генератора 3,8 А, давлении рабочего газа в камере  $7 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. при соотношении  $\text{CCl}_4:\text{Ar}$  10:1 и температуре охлаждающей воды +20°C скорость травления нитрида галлия составляла 400 Å/мин, а при подогреве подложки (температура охлаждающей воды 40°C) скорость травления GaN возрастала до 670 Å/мин (табл., Б). При экспозиции 30 мин данный режим также обеспечивал протравливание сапфировой подложки на глубину до 0,3 мкм, которое необходимо для устранения возможных остатков GaN, внедренных в подложку.

Сложные эпитаксиальные наноструктуры, как отмечалось выше, содержали *n*-структуру нитрида галлия, титан, алюминий, борид титана ( $\text{TiB}_x$ ), золото или *n*-структуру нитрида галлия, титан, алюминий, титан, золото [4]. Как отмечалось в работе [10], добавка 10% кислорода при травлении алюминия в плазме паров  $\text{CCl}_4$  полностью блокирует процесс ПХТ. При обработке структур было необходимо также травление сапфира на глубину 0,3–0,5 мкм ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), а наличие кислорода блокирует травление этого материала из-за больших энергий связи кислорода с алюминием (5—7 эВ) [9, с. 356]. Поэтому необходимо было отработать технологию травления сложной структуры в рабочих газах, не содержащих кислород.

В то же время для очистки поверхности и улучшения десорбции продуктов реакции необходима дополнительная ионная стимуляция поверхности. Для этого использовалась добавка аргона в плазму  $\text{CCl}_4$ . Несмотря на то, что потенциал ионизации аргона 15,76 эВ, а хлора — 13,01 эВ [9, там же], для получения иона аргона требуется меньшая энергия, т. к. для образования иона хлора вначале необходимо диссоциировать молекулу  $\text{CCl}_4$ . Кроме того, аргон, в отличие от кислорода, химически нейтрален и способствует только стимуляции поверхности к десорбции с нее продуктов реакции.

Таким образом, удалось успешно протравить сложные эпитаксиальные структуры с нитридом галлия общей толщиной примерно 1 мкм и сделать затрав в сапфир на 0,5 мкм за 35 мин. При этом средняя скорость травления эпитаксиальных структур составила 700 Å/мин, а при травлении сапфира средняя скорость уменьшалась до 540 Å/мин (табл., В). Для сравнения: при этих же условиях скорость распыления никеля была 230 Å/мин, скорость травления арсенида галлия — 4000 Å/мин, а алюминия — 5000 Å/мин. Понятно, что сравнительно низкая скорость травления сложных структур связана с тем, что скорости травления пленок, входящих в такую структуру, сильно отличаются, а, например, пленки титана намного быстрее травятся во фторсодержащих соединениях. Поэтому необходима дальнейшая доработка технологии травления сложных структур.

Увеличение плотности тока в разряде (табл., В) приводило к более быстрому распылению никелевой маски (например, при токе разряда 12,0 А и напряжении автосмещения 250 В). Поэтому необходима работа по увеличению стойкости никелевых масок и изучению зависимости стойкости масок от метода их напыления.

Следует отметить, что имеются пути увеличения скорости травления таких эпитаксиальных структур. Это, с одной стороны, увеличение разрядного тока в плазмохимическом реакторе при неизменной энергии ионов, с другой — подбор оптимальных составов газов, применяемых в качестве рабочих, т. к. приходится травить не только нитрид галлия, но и другие пленки, входящие в состав разработанных высокотемпературных контактов, выдерживающих, согласно работе [4], температуру 700°C без деградации.

На основе проведенных исследований были разработаны высокотемпературные датчики Холла для измерения напряженностей магнитных полей.

### Выводы

Таким образом, в плазмохимическом реакторе с замкнутым дрейфом электронов проведена обработка образцов эпитаксиальных слоев, содержащих нитрид галлия, и показана возможность травления таких структур в хлорсодержащей плазме. Разработана методика снятия поверхностного заряда с нитрида галлия, нанесенного на сапфир.

Предложена технология травления сложных эпитаксиальных слоев с GaN и получены скорости травления таких слоев до 700 Å/мин. Показано, что такие слои с нитридом галлия толщиной 1,0 мкм могут быть протравлены через маску из никеля толщиной 0,8 мкм с реализацией травления сапфировой подложки на глубину до 0,5 мкм.

Установлено, что травление эпитаксиальных слоев, содержащих нитрид галлия, является достаточно эффективным при энергиях ионов 250 эВ. При травлении в плазме с энергиями ионов  $\geq 350$  эВ происходит распыление никелевой защитной маски. Намечены пути увеличения скоростей травления сложных эпитаксиальных структур, содержащих нитрид галлия.

На основе проведенных исследований разработаны высокотемпературные датчики Холла для измерений напряженностей магнитных полей.

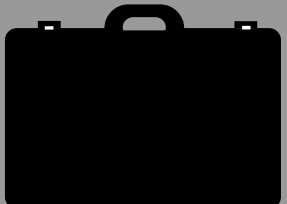
### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rumyantsev S. L., Shur M. S., Levinstein M. E. Materials properties of nitrides // International Journal of High Speed Electronics on Systems.— 2004.— Vol. 14, N 1.— P. 1—19.
2. Данилин В. Н., Докучаев Ю. А., Жуков Т. А., Комаров М. А. Мощные высокотемпературные радиационностойкие СВЧ-приборы нового поколения на широкозонных гетеропереходах AlGaIn/GaN // Обзоры по электронной технике. Сер. СВЧ-техника.— 2001.— Вып. 1.
3. Луценко Е. В., Зубелевич В. З., Павловский В. Н и др. Импульсные лазеры УФ-синей области спектра на основе гетероструктур GaN, выращенных на кремниевых подложках / Мат-лы междунар. науч. школы «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». — Николаев: Атолл, 2003.— С. 65—67.
4. Boltovets M. S., Ivanov V. N., Avksentyev A. Yu. et al. High temperature contacts to GaN and SiC based on TiB<sub>x</sub> nanostructure layers / Materials Science Forum. Vol. 483—485. Trans. Tech Publications, Switzerland, 2005.— P. 1061—1064.
5. Vassilevski K. V., Sizov V. E., Babanin A. J. et al. Dryetching of gallium nitride using CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, CCl<sub>4</sub>, and their mixtures with N<sub>2</sub> and air / Just. Phys. Conf., Ser. N 142, Chapter 6.— Paper presented at Silicon Carbide and Related Materials 1995 Conf.— Kyoto, Japan.— P. 1027—1030.
6. Коновал В. М., Усталов В. В., Федорович О. А. ПХР с замкнутым дрейфом электронов для производства элементов с субмикронными размерами / Мат-лы 6-й Междунар. Крымской микроволновой конференции «КрыМиКо-96». — Севастополь, Крым, Украина.— 1996.— С. 285—288.
7. Коновал В. М., Попов А. Ю., Усталов В. В. Модернизированный плазмохимический реактор с замкнутым дрейфом электронов для травления датчиков пироприемников / Мат-ли щорічн. наук. конф. ІЯД НАН України.— Київ.— 1995.— С. 173—176.
8. Горонковский И. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. Краткий справочник по химии.— Киев: Изд-во АН УССР, 1962.
9. Эберт Г. Краткий справочник по физике.— М.: Госиздат физ.-мат. литературы, 1963.
10. Коновал В. М., Усталов В. В., Федорович О. А., Чабан Б. И. Плазмохимическое травление алюминиевых пленок с микронными и субмикронными размерами элементов при низких энергиях ионов // Труды Украинского вакуумного общества.— 1995.— Т. 1.— С. 57—60.

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

- Прибор «Регион» для космического эксперимента «Кольцо» на борту МКС. (Украина, г. Одесса, Киев; Россия, г. Москва)
- Обзор мирового рынка печатных плат. (Россия, г. С.-Петербург)
- Интегральный первичный преобразователь давления на основе кремния с разделительной мембраной. (Украина, г. Киев, Винница)
- Устройство для управления шаговым двигателем на ПЛИС. (Украина, г. Одесса)
- Пьезокерамические электроакустические преобразователи мембранного типа. (Украина, г. Донецк)
- Мощные бескорпусные MOSFET-транзисторы для поверхностного монтажа. (Беларусь, г. Минск)
- Электропроводность нанокompозитов с хаотической структурой. (Украина, г. Одесса)
- Информационные технологии чтения маркировочных надписей компонентов печатных узлов в системах автоматизированного оптического контроля. (Украина, г. Одесса)
- Алгоритм анализа показателей качества электромагнитной совместимости РЭС АСУ. (Россия, г. С.-Петербург)
- Оптимизация аппаратно-программного обеспечения для автоматизации спектрофотометра СФ-20. (Украина, г. Черновцы)

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



К. т. н. И. М. СОЛЬСКИЙ

Украина, г. Львов, Научно-производственное предприятие «Карат»  
E-mail: solskii@carat.lviv.uaДата поступления в редакцию  
24.05 2005 г.Оппонент д. ф.-м. н. М. В. ПАШКОВСКИЙ  
(ЛНУ, г. Львов), к. ф.-м. н. В. Н. КАНИЩЕВ  
(Ин-т монокристаллов, г. Харьков)

## ВЫРАЩИВАНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМАТА КАДМИЯ С ВЫСОКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТЬЮ

*Рассмотрена технология получения крупногабаритных монокристаллов  $CdWO_4$  методом Чохральского. Приведены оптические и сцинтилляционные характеристики получаемых кристаллов и детекторов на их основе.*

В последние годы практические потребности экспериментальной физики высоких энергий и компьютерной томографии стимулировали значительный интерес к разработке новых сцинтилляционных детекторов на основе оксидных кристаллов, которые содержат элементы с большим атомным номером, что обуславливает высокую эффективность регистрации рентгеновского и  $\gamma$ -излучения, а также, как правило, радиационную и химическую стойкость.

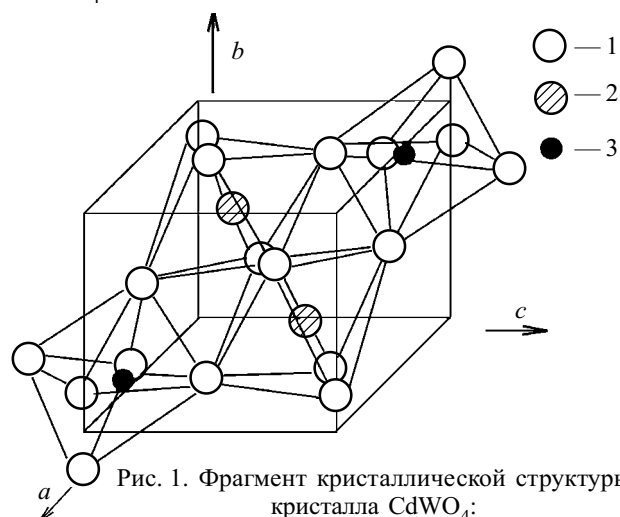
Вольфрамат кадмия  $CdWO_4$  (CWO) является ярким представителем этого класса материалов, поэтому вызывает интерес как перспективная среда для создания сцинтилляционных детекторов полного поглощения гамма-квантов (гамма-радиометры для экологического мониторинга, гамма-каротаж в геологии) и детекторов для рентгеновских компьютерных томографов [1, 2]. Однако характеристики данных кристаллов не полностью удовлетворяют техническим требованиям. К недостаткам CWO следует отнести большое время высвечивания, составляющее десятки микросекунд [2]. Это ограничивает возможности использования таких сцинтилляторов при высоких скоростях счета фотонов. Кроме этого, требует улучшения конверсионная эффективность CWO, которая приблизительно в два раза меньше аналогичной для эталонных сцинтилляторов NaI-Tl [3, с. 181]. Для повышения чувствительности методик измерения низкофонового радиоактивного излучения необходимо значительное увеличение объема кристаллов CWO при сохранении высокоэнергетического разрешения [4].

Задачей настоящей работы было рассмотрение существующих подходов к получению монокристаллов вольфрамата кадмия и представление результатов, полученных в НПП «Карат» в области разработки технологии выращивания крупногабаритных монокристаллов CWO, а также изготовления на их основе сцинтилляционных детекторов.

### Основные физико-химические свойства кристаллов $CdWO_4$

Рассмотрим коротко основные структурные и люминесцентные свойства кристаллов вольфрамата кадмия.

Вольфрамат кадмия относится к структурному типу вольфрамита (моноклинная сингония, пространственная группа  $P2_1/C$ ). В элементарную ячейку вольфрамита входят две формульные единицы. На рис. 1 представлено изображение элементарной ячейки  $CdWO_4$  [5]. Структуру CWO можно рассматривать



как несколько деформированную гексагональную упаковку атомов кислорода. В центрах кислородных восьмигранников расположены атомы Cd или W. Катионы одного элемента находятся в плоскостях, параллельных (100). Анионы кислорода, которые расположены между этими плоскостями, не лежат в одной плоскости, а образуют слой толщиной порядка 0,2 Å. Такой тип структуры создает открытые каналы вдоль направления  $c$ . Таким образом, структуру вольфрамита можно описать как систему зигзагоподобных цепочек, причем каждая цепочка состоит лишь из октаэдров, в центре которых находится атом одного сорта металла. Связь между катионом  $Cd^{2+}$  и анионом  $WO_6^{6-}$  — ионная, а связи в самом комплексе  $WO_6^{6-}$  в основном ковалентные.

Длительное время считалось, что вольфрамат кадмия обладает лишь одной широкой полосой люминесценции в области 420—580 нм (“сине-зеленое”

свечение) [6], которое возбуждается на длинноволновом крыле собственного поглощения (250—320 нм). При 4,2 К ее максимум расположен вблизи 490 нм, а полуширина полосы свечения составляет  $4400 \text{ см}^{-1}$ . В более поздних работах [7, 8] было показано, что при возбуждении в области  $\lambda > 320 \text{ нм}$  в спектре излучения наблюдается также и вторая полоса с максимумом при 570 нм (“желтое” свечение).

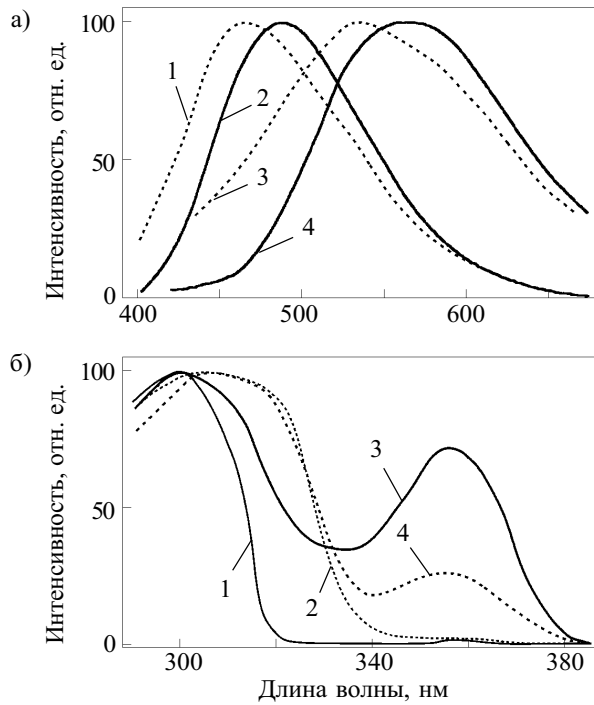


Рис. 2.

а — спектральное распределение фотолюминесценции CWO [3, с. 177]:

1 —  $\lambda_{\text{возб}}=275 \text{ нм}$ ,  $T=298 \text{ К}$ ; 2 —  $\lambda_{\text{возб}}=275 \text{ нм}$ ,  $T=4,2 \text{ К}$ ; 3 —  $\lambda_{\text{возб}}=360 \text{ нм}$ ,  $T=298 \text{ К}$ ; 4 —  $\lambda_{\text{возб}}=360 \text{ нм}$ ,  $T=4,2 \text{ К}$ ;

б — спектр возбуждения фотолюминесценции CWO [3, с. 177]: 1 —  $\lambda_{\text{люм}}=465 \text{ нм}$ ,  $T=4,2 \text{ К}$ ; 2 —  $\lambda_{\text{люм}}=460 \text{ нм}$ ,  $T=298 \text{ К}$ ; 3 —  $\lambda_{\text{люм}}=600 \text{ нм}$ ,  $T=4,2 \text{ К}$ ; 4 —  $\lambda_{\text{люм}}=580 \text{ нм}$ ,  $T=298 \text{ К}$

Соответствующие спектры фотолюминесценции и спектры ее возбуждения представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, с ростом температуры обе полосы излучения смещаются в более коротковолновую область спектра, при этом возрастает их полуширина. Это смещение составляет  $\approx 20 \text{ нм}$  для “сине-зеленого” свечения и  $\approx 35 \text{ нм}$  для “желтого” свечения. Спектр возбуждения “сине-зеленой” люминесценции характеризуется наличием широкой полосы с максимумом при 300 нм ( $T=4,2 \text{ К}$ ). При переходе к комнатной температуре этот максимум смещается до 305 нм (рис. 2, б). Для “желтого” свечения наблюдается дополнительная полоса возбуждения с максимумом при 355 нм. Положение этой полосы не зависит от изменения температуры. Сильное перекрытие обеих полос фотолюминесценции служит причиной появления полосы возбуждения “сине-зеленого” свечения также и в аналогичном спектре “желтого” свечения.

Исследование кинетики послесвечения [7] показало, что в широком температурном интервале (1,5—300 К) кривые затухания обеих полос люминесценции носят экспоненциальный характер. Температур-

ная зависимость времени послесвечения  $\tau$  “сине-зеленого” свечения представлена на рис. 3. При  $T=1,5 \text{ К}$  величина  $\tau$  составляет 300 мкс. С ростом температуры это время уменьшается, и при  $T=40 \text{ К}$   $\tau=20 \text{ мкс}$ . Далее в температурном интервале 40—300 К величина времени послесвечения остается неизменной. Оказалось также, что во всем исследуемом температурном диапазоне время затухания “желтой” полосы люминесценции остается неизменным и составляет  $\tau=3,6 \text{ мкс}$ .

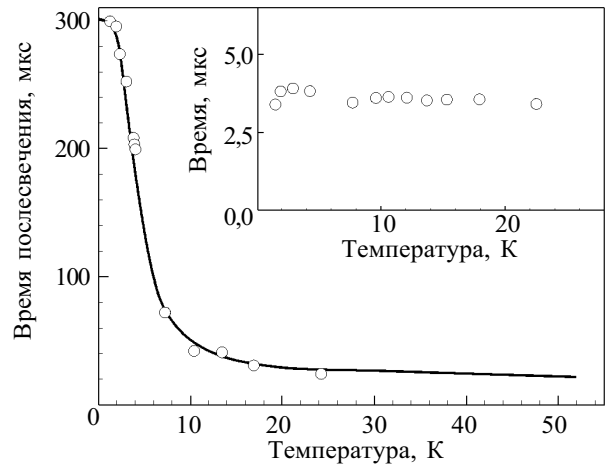


Рис. 3. Температурная зависимость времени послесвечения “сине-зеленого” и “желтого” (на вставке) излучения CWO [7]

Авторы [7] связывают “сине-зеленую” люминесценцию CWO с электронными переходами внутри октаэдрического комплекса  $\text{WO}_6^{6-}$ . Характерная температурная зависимость кинетики послесвечения в области низких температур свидетельствует о наличии излучающего центра с двумя возбужденными состояниями, расщепление между которыми составляет  $12 \text{ см}^{-1}$ .

Длинноволновая полоса излучения (“желтое” свечение) в работе [7] связывается с переходами в вольфраматной группе, в которой отсутствует один ион кислорода. Такой вывод базируется на том, что спектр возбуждения этого излучения включает в себя полосу поглощения в области 350 нм, которая приписывается структурным дефектам, и ее величина зависит от условий выращивания кристаллов и их послеростовой обработки.

Ниже приведены некоторые физико-химические характеристики кристаллов CWO.

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| Плотность, $\text{г/см}^3$       | 7,9       |
| Температура плавления, К         | 1598      |
| Плоскость скальвания             | <010>     |
| Гигроскопичность                 | Нет       |
| Максимум в спектре излучения, нм | 740 и 540 |
| Показатель преломления           | 2,3       |
| Среднее время затухания, мкс     | 12        |
| Послесвечение через 3 мс, %      | 0,1       |
| Световыход, % от NaI-Tl          | 25—40     |

Характерной особенностью сцинтилляторов на базе кристалла CWO является их достаточно высокий световой выход (который составляет до 40% относительно NaI-Tl), а также высокая радиационная и

химическая стойкость. Возможность получения удельно-высокого разрешения, высокая эффективность регистрации, стойкость к действию климатических и механических факторов позволяют применять монокристаллы CWO там, где использование гигроскопичного и менее механически стойкого кристалла NaI—Tl невозможно [1—3].

Следует отметить также уникальное свойство CWO — почти полную независимость светового выхода от температуры в широком температурном интервале [6], тогда как, например, для германата висмута  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) световой выход в интервале 200—373 К понижается в 10 раз. При температуре 373 К падение светового выхода для кристаллов NaI—Tl составляет более 50% в сравнении с величиной, измеренной при 300 К, тогда как для кристаллов CWO оно не превышает 15—20% [2]. Особенно выгодно использовать CWO при температурах ниже 343 К, когда световой выход изменяется незначительно, а время послесвечения существенно уменьшается.

Одним из важных свойств кристаллов CWO является малое послесвечение, которое составляет менее 0,02% от начального уровня через 30 мс после прекращения облучения. Это делает кристаллы CWO незаменимым сцинтилляционным материалом для томографии.

Световой выход CWO пропорционален энергии  $\gamma$ -квантов [9], поэтому при хорошей прозрачности на длине волны собственного излучения этот кристалл может быть использован для спектрометрии  $\gamma$ -излучения. Благодаря высокому атомному номеру и плотности CWO детекторы на его основе обладают высокой регистрационной эффективностью в малых объемах.

Приведенные выше данные о свойствах и характеристиках кристаллов вольфрамата кадмия свидетельствуют об актуальности разработки воспроизводимой технологии получения кристаллов больших размеров ( $\varnothing 60$ —65 мм, длина цилиндрической части не меньше 140 мм) и с высоким оптическим качеством.

### Выращивание кристаллов CWO

Из целого ряда методов выращивания монокристаллов CWO наиболее распространенным на данное время стал метод Чохральского.

Анализ режимов синтеза исходного сырья CWO проведен в работах [10—13]. Получение шихты для выращивания базируется на реакции твердофазного синтеза между оксидами кадмия и вольфрама. В особенности следует обратить внимание на то, что в процессе роста происходит испарение компоненты Cd из расплава, что приводит к нарушению стехиометрического состава выращенного кристалла и является одной из причин появления в нем дефектов.

В кристаллах, выращенных из шихты с недостатком более летучей компоненты Cd, по всей длине кристаллической були наблюдаются в большом количестве макродефекты с размерами 10—30 мкм. Такие кристаллы непригодны для практического применения, поскольку присутствие включений приводит к росту рассеяния света и ухудшению энергетического разрешения детекторов [10]. Введение в рас-

плав избыточного CdO (1—1,5%) улучшает оптическое качество кристаллов, однако не приводит к полному исчезновению макродефектов [12, 13]. В то же время приготовление строго стехиометрической шихты не разрешает получать оптически качественные монокристаллы  $\varnothing 30$ —35 мм. Вследствие перегрева расплава возле стенок тигля происходит нарушение его стехиометрии, вызванное термическим распадом CWO [14].

В работе [10] были установлены значения оптимального отношения количества Cd к количеству  $\text{WO}_3$  в расплаве ( $K=1,009$ ), при котором отклонение состава кристалла от стехиометрического было минимальным.

Причиной появления дефектов может служить не только отклонение состава шихты от стехиометрического, а и наличие неконтролируемых примесей. В частности, качественные кристаллы со световым выходом 30% и более относительно NaI—Tl можно получить лишь при условии использования шихты с содержанием примесей не более  $10^{-4}$  мас. % [9].

Как показано в работах [12, 13, 15, 16], важным фактором, определяющим качество кристаллов CWO, является температурный градиент на границе раздела «кристалл—расплав». Данный градиент одновременно с другими параметрами (скорость вращения кристалла, скорость вытягивания, соотношение диаметра тигля и кристалла) определяет форму межфазной границы, амплитуду и частоту температурных осцилляций, процессы микросегрегации примесей. Оказалось, что радикальным средством избежания дефектов и блочности является недопущение переохлаждения расплава на начальной стадии роста. Это обусловлено тем, что механизм образования дефектов связан главным образом с несоответствием габитуса растущего кристалла и внутренней симметрии расплава в переохлажденном состоянии. Предотвращение переохлаждения расплава однозначно позволяет избежать появления макровключений, уменьшить блочность, а также существенно уменьшить содержание центров рассеяния.

На основе исследований, проведенных в [11], было показано, что минимальная плотность дислокаций наблюдается в булях, рост которых осуществлялся в атмосфере кислорода. Было определено, что оптимальное значение давления кислорода в камере составляет  $1,5 \cdot 10^5$ — $1,7 \cdot 10^5$  Па.

Важным для получения кристаллов CWO является выбор кристаллографического направления, вдоль которого происходит рост. В CWO диффузия протекает медленно в направлениях [010] и [100]. Поэтому кристаллы, выращенные в направлениях [001], «закрыты» для диффузии, что существенно затрудняет ликвидацию дефектных центров путем термической обработки.

Было установлено, что на заключительной стадии выращивания кристалла перед охлаждением необходимо проводить сужение були с целью уменьшения потока тепла от расплава. После этого кристаллическая буля или отрывается от расплава, или охлаждается, будучи соединенной с расплавом тонким перешейком. Данная процедура применяется с целью уменьшения термического удара при отрыве кристалла

от расплава, который может привести к резкому увеличению плотности дислокаций в хвостовой части слитка.

Проведенный анализ литературных источников по проблеме выращивания монокристаллов вольфрамата кадмия [2, 3, 11] показал, что основными задачами, которые необходимо решать для получения высококачественных кристаллов большого размера, являются:

- создание однородного теплового поля на границе раздела «кристалл—расплав», а также при охлаждении выращенного кристалла;
- установление оптимальной концентрации оксида кадмия в расплаве;
- уменьшение концентрации примесей в расплаве;
- установление оптимальной концентрации кислорода в атмосфере выращивания.

Ниже приведены технологические приемы, которые были применены в НПП «Карат» для получения высококачественных кристаллов вольфрамата кадмия.

При разработке технологического процесса выращивания монокристаллов CWO больших размеров ( $\varnothing 60$ —65 мм и длина цилиндрической части не меньше 140 мм) были приняты во внимание следующие факторы:

- Содержание примесей Fe, Ni, Cr, Cu, Co в исходном сырье не должно превышать  $10^{-4}$  мас. % [10].
- При подготовке исходного сырья необходимо учитывать испарение Cd в процессе выращивания кристалла [10].
- Режимы смешивания и синтеза шихты должны обеспечивать получение монофазного соединения  $CdWO_4$ .
- Осевой градиент температуры должен обеспечивать плавную, выпуклую форму поверхности раздела фаз (фронта кристаллизации) на протяжении всего процесса выращивания кристалла.
- Конструкция теплового узла должна обеспечивать максимальную симметрию тепловых полей и минимальные радиальные градиенты температуры, а также равновесный послеростовой отжиг кристалла.
- Для обеспечения постоянной скорости выращивания кристалла скорость вытягивания кристалла должна задаваться с учетом понижения уровня расплава.
- Скорость вращения кристалла должна изменяться с учетом изменения теплоотвода от фронта кристаллизации в процессе роста.

На основе проведенных технологических исследований была установлена необходимая квалификация исходных компонентов, режимы синтеза и соотношение составляющих частей шихты, что влияет на качество монокристаллов. В частности, было установлено, что для получения высококачественной монофазной шихты  $CdWO_4$  необходимо брать порошки оксида вольфрама ( $WO_3$ ) квалификации ОСЧ 16-3 и карбоната кадмия ( $CdCO_3$ ) квалификации не хуже ХЧ ТУ 6-09-4399—88, причем размеры зерен порошков обоих компонентов должны быть близкими.

Стехиометрическая смесь порошков прессовалась в «таблетки» и проходила твердофазный синтез на воздухе при температуре 1273 К на протяжении 10 ч. На-

плавка шихты в тигель проводилась с обеспечением минимального перегрева.

В ходе наших исследований был сконструирован и изготовлен тепловой узел [17, 18], который позволил оптимизировать совокупность факторов, обеспечивающих стабильность тепловых условий и фронта кристаллизации. Основу теплового узла составляют платиновый тигель диаметром 150 мм и активный (разогреваемый высокочастотным электромагнитным полем) тепловой экран диаметром 160 мм. Отношение диаметра тигля к его высоте составляло 1,5. Тигель и экран окружены тремя слоями корундовой изоляции, что разрешило создать в рабочем объеме необходимые осевой и радиальные градиенты температуры.

Монокристаллы выращивались на воздухе на ориентированную заправку. Направление роста [001] лежит в плоскости интенсивного скалывания.

Скорость выращивания монокристалла CWO в течение всего процесса составляла 3 мм/ч, а скорость вытягивания рассчитывалась компьютером на основе данных взвешивания выращиваемого кристалла, плотности кристалла и расплава. При этом автоматически учитывалось понижение уровня расплава.

Изменения осевого градиента температуры в процессе роста корректировались путем запрограммированного изменения скорости вращения кристалла от 18 до 15 об/мин на стадии выхода на диаметр и от 15 до 18 об/мин на стадиях выращивания цилиндрической части кристалла и обратного конуса.

Для снижения концентрации неконтролируемых примесей процессы выращивания проводились в два этапа. На первом — из синтезированной шихты вытягивались монокристаллы CWO и проводился их химический анализ. Затем в зависимости от результатов анализа осуществлялось корректирование состава путем добавления необходимого количества  $CdCO_3$ , а монокристаллы, полученные на первом этапе, использовались как сырье для получения монокристаллов необходимого качества. Для изучения этой взаимосвязи нами исследовалось оптическое поглощение и световой выход сцинтилляционных элементов, полученных из кристаллов CWO, выращенных из шихты с различным содержанием оксида кадмия, концентрация которого изменялась путем догрузки определенного количества  $CdCO_3$  перед каждым процессом выращивания.

#### Оптические свойства кристаллов $CdWO_4$

На рис. 4 приведены спектры поглощения образцов кристаллов CWO ( $20 \times 20 \times 2$  мм), выращенных из перекристаллизованного сырья с разной величиной избытка Cd (кривые 1—3). Кристаллы, полученные из шихты без избытка Cd (кривая 1), характеризуются заметной окраской зелено-желтого цвета. По мере увеличения концентрации избыточного Cd интенсивность поглощения уменьшается (кривые 2, 3), и при концентрации избыточного Cd  $\approx 1,0$  мас. % в шихте кристаллы CWO являются практически бесцветными по всей длине цилиндрической части (до 140 мм).

Спектр дополнительного поглощения (рис. 4, вставка), полученный путем вычитания кривых 1 и 3, можно представить в виде суперпозиции двух полос:

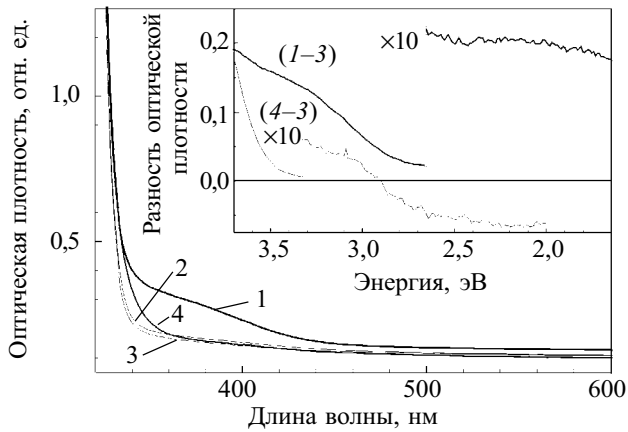


Рис. 4. Спектр поглощения кристаллов CWO, полученных из перекристаллизованной шихты при различной величине избытка CdO (1 — без избытка; 2 — 1,0 мас.%; 3 — 1,1 мас.%; 4 — кристалл CWO, выращенный из шихты на основе CdCO<sub>3</sub> и WO<sub>3</sub> с избытком 1,1 мас.% CdO. Вставка: спектры дополнительного поглощения кристаллов CWO, полученные как разница между спектрами 1 и 3, 4 и 3

интенсивной с максимумом при 3,4—3,3 эВ (365—370 нм) и более слабой с максимумом при 2,21 эВ (560 нм). Наиболее вероятной причиной дополнительного поглощения кристаллов CWO в области сцинтилляций является наличие дефектов структуры, обусловленных испарением определенного количества Cd как наиболее летучего компонента. В этом случае уже после первой кристаллизации мы получаем шихту с соотношением компонент Cd/W < 1, чему соответствует определенный уровень концентрации вакансий кадмия V<sub>Cd</sub><sup>2-</sup> и кислорода V<sub>O</sub><sup>2+</sup>, а также, возможно, и их ассоциатов. Именно центр V<sub>Cd</sub><sup>2-</sup> отвечает, очевидно, за интенсивную полосу дополнительного поглощения CWO с максимумом в области 365—370 нм, что в целом согласуется с данными [10, 11, 19], тогда как поглощение в области длин волн > 450 нм может быть связано с центрами, образованными дефектами в анионной подрешетке [3].

Следует заметить, что наличие оптически активных центров, связанных с дефектами решетки, существенно влияет на сцинтилляционные параметры кристаллов (табл. 1). Из таблицы видно, что по мере увеличения избытка Cd в расплаве и уменьшения дополнительного поглощения возрастает световой выход образцов — как при возбуждении источником

γ-квантов (<sup>60</sup>Co, E=1,02 МэВ), так и при возбуждении α-частицами (<sup>239</sup>Pu, E=5,5 МэВ). Для бесцветных кристаллов CWO, выращенных с избытком 1,0—1,1 мас.% Cd в шихте, достигается максимальное значение светового выхода — 36,5% от NaI:Тl.

С целью выбора оптимальных технологических вариантов приготовления исходного сырья нами были также получены кристаллы CWO из шихты на основе CdCO<sub>3</sub> и WO<sub>3</sub>, которая содержала избыток CdCO<sub>3</sub> (в перерасчете на Cd) 1,1 мас.%. Спектр поглощения элемента из такого кристалла представлен на рис. 4 кривой 4. Кристалл обладает желтоватой окраской, которой отвечает спектр дополнительного поглощения, содержащий полосу с максимумом при 3,1 эВ (≈400 нм) в видимой области спектра (рис. 4, вставка, кривая (4-3)). С учетом данных по поглощению кристаллов 1—3, для кристалла 4 скорее всего справедливо соотношение Cd/W > 1. Световой выход таких кристаллов составляет 0,87—0,9 от значения для образца № 3 (табл. 1).

Исходя из изложенных выше результатов оптимальным с точки зрения достижения наибольших значений оптической прозрачности и светового выхода является, по нашему мнению, выращивание кристаллов CWO из перекристаллизованного сырья с коррекцией шихты в сторону 1,0—1,1 мас.% избытка Cd.

**Характеристики сцинтилляционных детекторов**

После выращивания из монокристаллов CWO изготавливались образцы необходимой формы и размеров. Для механической обработки использовались станки “Алмаз-6”, “Алмаз-12” (резка), СДШ, СДП, В1М3 (шлифование и полирование). Полирование проводилось на алмазных порошках АСМ-С с размерами зерна 2/1 мкм.

Были изготовлены сцинтилляционные элементы размерами Ø40×40 мм и Ø60×60 мм, которые обладали световым выходом ≈36,5% относительно NaI:Тl и энергетическим разрешением ≈9% при возбуждении источником γ-квантов <sup>137</sup>Cs (662 кэВ) [16]. Результаты по измерению энергетического разрешения наших кристаллов большого объема приведены в табл. 2. Там же для сравнения приведено разрешение “эталонного” кристалла CWO небольшого размера (10 см<sup>3</sup>), которое является рекордным — 7,5% при энергии 662 кэВ [4].

Изготовленные сцинтилляционные элементы, поставленные НПО “Селди”, стали основой сцинтилляционных детекторов, которые прошли испытания в составе низкофонового γ-радиометра для регистра-

Таблица 1

Зависимость световых выходов кристаллов CWO, полученных из перекристаллизованной шихты, от избытка CdO

| Номер образца | Величина добавки CdO, мас. % | Световых выходов образцов, отн. ед. |                                  |                                   |  |
|---------------|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--|
|               |                              | по <sup>60</sup> Co (τ=2 мкс), %    | по <sup>60</sup> Co (τ=5 мкс), % | по <sup>239</sup> Pu (τ=5 мкс), % | относительно NaI-Тl (4,4 отн. ед. свет. вых.), % |
| 1             | 0,0                          | 68                                  | 73                               | 83                                | 26,4   |
| 2             | 1,0                          | 90,5                                | 95                               | 90                                | 34,7   |
| 3             | 1,1                          | 100                                 | 100                              | 100                               | 36,5   |
| 4*            | 1,1                          | —                                   | 87                               | 92,6                              | —  |

\*Образец 4 изготовлен из перекристаллизованной шихты.

Таблица 2

Энергетическое разрешение кристаллов CWO, %

| Характеристики кристаллов         |           | Энергия возбуждения |         |          |
|-----------------------------------|-----------|---------------------|---------|----------|
| Размеры (объем)                   | Масса, кг | 570 кэВ             | 662 кэВ | 1063 кэВ |
| Ø40×30 мм (37,5 см <sup>3</sup> ) | 0,3       | 9,7                 | 8,5     | 6,7      |
| Ø50×37 мм (73 см <sup>3</sup> )   | 0,6       | 11,1                | 9,8     | 7,6      |
| Ø54×65 мм (149 см <sup>3</sup> )  | 1,1       | 13,2                | 11,4    | 9,3      |
| Ø54×95 мм (217 см <sup>3</sup> )  | 1,7       | 14,9                | 13,8    | 11,1     |
| Ø25×20 мм (10 см <sup>3</sup> )   | 0,08      | 8,8                 | 7,5     | 6,4      |

ции низких уровней радиоактивности (завод “Эталон”, г. Белая Церковь, Украина).

\*\*\*

Таким образом, разработан технологический процесс выращивания монокристаллов вольфрамата кадмия больших размеров (диаметр 60—65 мм, длина 140 мм) с удовлетворительными оптическими свойствами.

На базе выращенных монокристаллов изготовлены сцинтилляционные элементы, ставшие основой детекторов для низкофонового  $\gamma$ -радиометра.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Цирлин Ю. А., Глобус М. Е., Сысоева Е. П. Оптимизация детектирования гамма-излучения сцинтилляционными кристаллами.— М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Nagomaya L. L. Scintillators based on compound oxides for detection of ionic radiation // Nucl. Tracks. Radiat. Meas.— 1993.— Vol. 21, N 1.— P. 15—18.
3. Глобус М. Е., Гринев Б. В. Неорганические сцинтилляторы. Новые и традиционные материалы.— Харьков: Акта, 2001.
4. Георгадзе А. Ш., Даневич Ф. А., Здесенко Ю. Г. и др. Сцинтилляторы CdWO<sub>4</sub> большого объема // Приборы и техника эксперимента.— 1996.— № 3.— С. 48—52.
5. Norell D. I., Cantrell I. S., Chang L. I. Phase relation and crystal structures of Zn and Cd tungstates // J. Amer. Ceram. Soc.— 1980.— Vol. 63, N 5—6.— P. 261—264.
6. Kroger F. A. Some aspects of the luminescence of solids. Chap. 3.— Amsterdam: Elsevier. Publ. Co., 1948.
7. Lammers M. J. J., Blasse G., Robertson D. S. The luminescence of cadmium tungstate // Phys. Stat. Sol. (a).— 1981.— Vol. 63, N 2.— P. 569—572.
8. Ovechkin A. E., Ryzhikov V. D., Tomylaitis G., Zukauskas A. Luminescence of ZnWO<sub>4</sub> and CdWO<sub>4</sub> crystals // Ibid.— 1987.— Vol. 103, N 2.— P. 285—290.
9. Нагорная Л. Л., Овечкин А. Е., Вострецов Ю. Я. и др. Спектрометрические характеристики дефектов на основе монокристаллов вольфрамата кадмия // Проблемы получения и исследования монокристаллов.— 1988.— № 21.— С. 54—59.
10. Батенчук М. М. Влияние дефектов структуры на люминесценцию и сцинтилляционные свойства вольфраматов / Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.— Львов: ЛГУ, 1985.
11. Лимаренко Л. Н., Носенко А. Е., Пашковский М. В. Влияние структурных дефектов на физические свойства вольфраматов.— Львов: Вища школа, 1978.
12. Robertson D. S., Young I. M., Telfer J. R. The cadmium oxide-tungsten oxide phase system and growth of cadmium tungstate single crystals // J. Mater. Sci.— 1979.— Vol. 14.— P. 2967—2974.
13. Whiffin P. A. C., Brice J. C. The suppression of thermal oscillation in Czochralski growth // J. Cryst. Growth.— 1971.— Vol. 10.— P. 91—96.
14. Кобзарь-Зленко В. А. Влияние давления инертного газа на термическую устойчивость расплавов молибдатов и вольфраматов // Монокристаллы и техника.— 1972.— Вып. 7.— С. 90—94.
15. Cokayne B., Lent B., Roslingtong J. M. Interface shape changes during the Czochralski growth of gadolinium gallium garnet single crystals // J. Mater. Sci.— 1976.— Vol. 11.— P. 209—263.
16. Carruthers J. R. Flow transitions and interface shapes in the Czochralski growth of oxide crystals // J. Cryst. Growth.— 1976.— Vol. 36.— P. 212—214.
17. Nekrasov V., Borodenko Yu., Selegenev E. et al. Scintillation blocks of high sensitivity for detection of gamma-radiation based on cadmium tungstate // Proceedings of the 5th International Conf. on Inorganic Scintillators and their Applications SCINT99.— Moscow, Russia.— 1999.— P. 740—745.
18. Сольский И. М., Сугак Д. Ю., Габа В. М. Получение оптически однородных монокристаллов ниобата лития // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 5.— С. 55—61.
19. Melcher C. L., Manete R. A., Schweitzer J. S. Applicability of barium fluoride and cadmium tungstate scintillators for well logging // IEEE Trans. Nucl. Sci.— 1989.— Vol. 36, N 1.— P. 1188—1192.

#### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



#### **Неволин В. К. Зондовые нанотехнологии в электронике.— М.: Техносфера, 2005.— 152с.: ил.**

Прогресс в микроэлектронике связывают с уменьшением линейных размеров функциональных элементов. Если их размеры становятся порядка нанометров, то существенными являются квантовые эффекты, принципиально меняющие физику работы. Созданием таких элементов и интегральных квантовых схем на их основе занимается нанотехнология.

В монографии изложены физические основы зондовой нанотехнологии на базе сканирующих туннельных и атомно-силовых микроскопов, показаны основные достижения, обсуждаются проблемы, требующие решения.

Предназначена для студентов старших курсов, аспирантов и молодых ученых, желающих познакомиться с новым научным направлением и попробовать свои силы в развитии технологии XXI века.

НОВЫЕ КНИГИ



#### **Нанотехнологии в электронике. Под. ред. чл.-корр. РАН Ю. А. Чаплыгина.— М.: Техносфера, 2005.**

В монографии с позиций современных научно-технических достижений анализируются перспективные направления внедрения нанотехнологии в области разработки и создания материалов, приборов и структур для нанoeлектроники, фотоники, микро- и наносистемной техники, биомедицинской техники.

Книга написана ведущими специалистами Московского государственного института электронной техники (технического университета) (МИЭТ) на основе теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в МИЭТ в последние годы.

Для специалистов, аспирантов и студентов, работающих в области нанотехнологий и в смежных областях.

А. В. НАУМОВ

Россия, ООО «КВАР»

Перепечатано из журнала "Известия  
вузов. Материалы электронной техники",  
№ 2/2005

## ОБЗОР МИРОВОГО РЫНКА АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

На основе публикаций последних лет рассмотрены изменения рынка арсенида галлия после кризиса 2001 г., предложена периодизация и описаны тенденции развития рынка приборов на его основе, а также состояние российского рынка.

## Цикличность развития рынка GaAs (попытка хронологии)

В начале 60-х гг. XX в. появились первые оптоэлектронные приборы на основе GaAs: светодиоды (СД) для использования, например, в дисплеях кварцевых часов. В середине 1960-х гг. начались исследования возможностей применения GaAs в интегральных схемах (ИС), которые завершились разработкой ИС высокого быстродействия, используемых в «интеллектуальных» системах управления огнем и суперкомпьютерах, однако «свободного рынка» GaAs в эти годы не существовало из-за ограниченного применения и «нерыночного» характера «военных» потребителей. Тем не менее развитие производства приборов вызвало стремительный рост производства монокристаллов GaAs и разработку технологии выращивания слитков все большего диаметра (рис. 1, табл. 1).

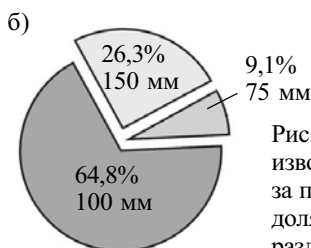
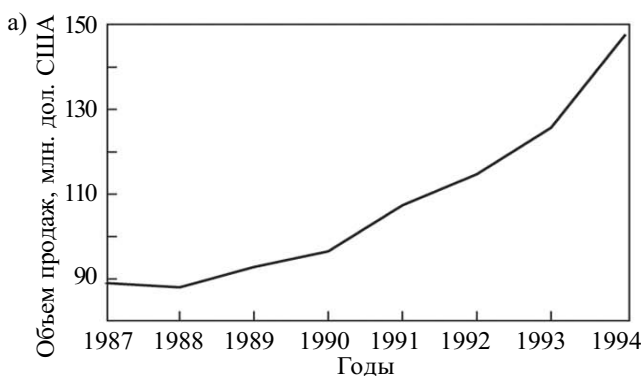


Рис. 1. Рост объема мирового производства монокристаллов GaAs за период с 1987 по 1994 гг. (а) и доля потребления пластин GaAs различного диаметра в 2000 г. (б)

Таблица 1  
Рост диаметра слитков GaAs за период с 1964 по 2000 гг.

| Год  | Диаметр, мм  | Фирма-производитель          |
|------|--|------------------------------|
| 1964 | Первый кристалл, полученный методом Чохральского с жидкостной герметизацией расплава | RSRE                         |
| 1971 | 50   | Bell Laboratories            |
| 1984 | 100  | Westinghouse                 |
| 1991 | 150  | Little Airton                |
| 2000 | 200  | Friberger Compound Materials |

Прошедший 2004 г. можно условно считать годом 10-летнего юбилея «свободного рынка» GaAs: в 1994 г. в США впервые производство коммерческих приборов превысило производство приборов военного назначения. Будем отсчитывать от этой точки начало первого «цикла развития» GaAs. Если ранее 80—90% всего произведенного GaAs расходовалось на военные цели, то после 1994 г. стала превалировать продукция гражданского назначения, а сегодня 90—95% всего рынка GaAs потребляют мирные отрасли.

Толчком стало создание СД различного применения, далее последовало развитие ИС для систем обработки и передачи данных по волоконно-оптическим линиям связи и появление большого числа коммерческих космических спутников связи, для которых требовалось бортовое питание на основе солнечных батарей из GaAs. Наконец, появление и широчайшее распространение мобильной телефонии, где и в базовых станциях, и в мобильных телефонах (особенно начиная со стандарта GSM) используются ИС на основе GaAs. Мобильные телефоны также «вдохнули вторую жизнь» в рынок СД для подсветки дисплеев.

Количество приборов в мире на основе арсенида галлия непрерывно росло (рис. 2, а). Цикличность полупроводникового рынка, испытывающего подъемы и спады, к тому времени была уже хорошо известна (рис. 2, б). Однако большинство аналитиков считало, что рынок арсенида галлия (составляющий не более 6—8% общего полупроводникового рынка) если и будет подвержен цикличности, то она выразится не в абсолютном спаде, а лишь в замедлении темпов прироста.

С 1994—1995 гг. начался бум на рынке арсенида галлия (например, как индикатор процесса, цены на

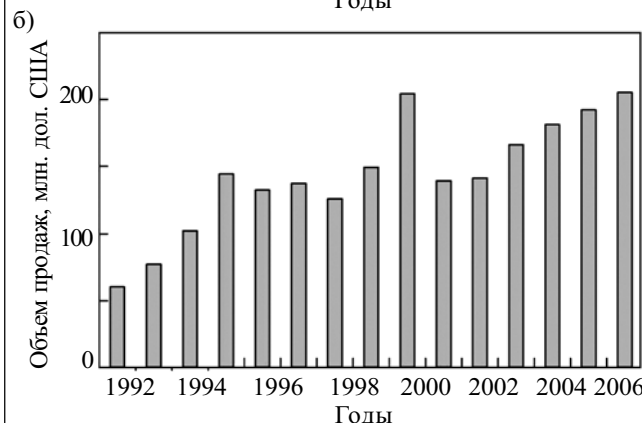
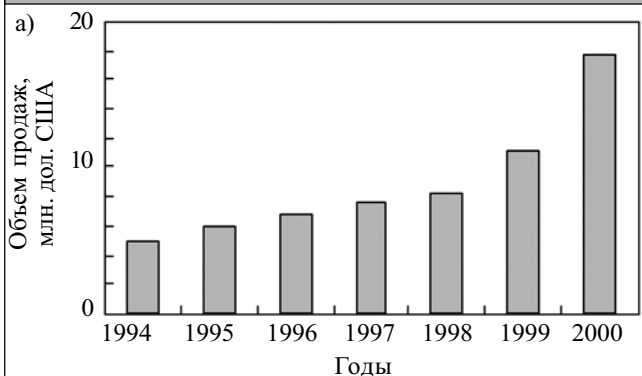


Рис. 2. Динамика рынка приборов на арсениде галлия (а) и общего рынка полупроводников (б)

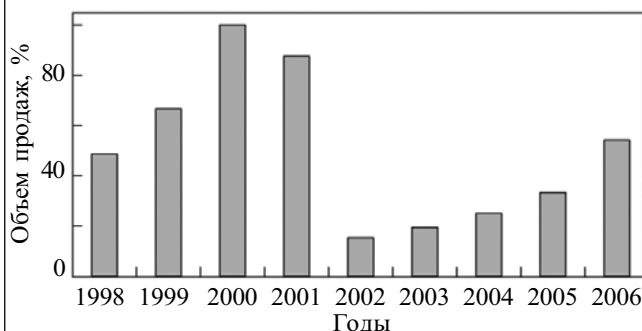


Рис. 3. Изменение рынка волоконно-оптических линий связи в 1998—2004 гг. по отношению к 2000 г. и прогноз до 2006 г. (Источник — Umicore)

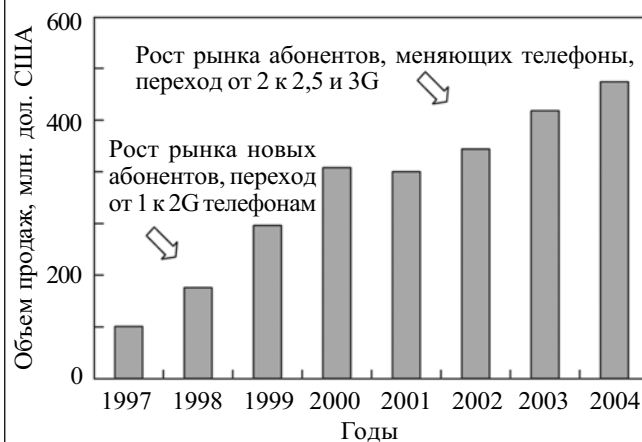


Рис. 4. Мировой рынок продаж мобильных телефонов в 1997—2004 гг. (Источник — Compond Semiconductor)

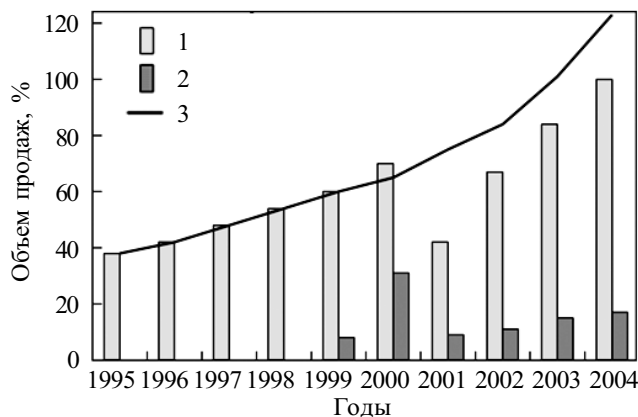


Рис. 5. Динамика роста мирового рынка пластин полупроводящего GaAs по отношению к 2004 г.: 1 — потребление подложек полупроводящего GaAs; 2 — складские запасы (1995—1998 гг. — нет данных); 3 — прогноз «Strategies» (1999 г.) до 2004 г.

галлий начали расти и за 1995—2000 гг. выросли на 80%). В начале 2000 г. взлет рынка достиг апогея, и сложилась любопытная ситуация: в сознании большинства участников исключительно высоко оценивались одновременно два рынка ИС — для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и сотовой телефонии. И, как показали последующие события, оба оказались переоцененными. Рынок ВОЛС бурно рос с 1998 г. до 2001 г. (на 350% в 2001 г. по отношению к 1998 г.), однако в 2002 г. произошел спад до уровня 1998 г. (рис. 3). Рынок мобильной телефонии вырос в 2000 г. на 400% по отношению к 1997 г., но в 2001 г. не оправдал ожиданий и сильно «сжался» (рис. 4).

Но тогда в начале 2000 г. производители арсенида галлия в ожидании больших заказов на приборы начали ажиотажную скупку галлия, что вызвало небывалый рост его цены — 2000 дол. США/кг. В 1999 г. прогноз «Strategies» на развитие рынка GaAs был оптимистичным (рис. 5, сплошная кривая). В 2000 г. потребление превысило прогноз. В середине 2001 г. стало ясно, что надежды не оправдываются, накоплены как избыточные мощности, так и излишние складские запасы (рис. 5, столбчатые диаграммы). Например, потребление галлия упало за период с 2000 г. до 2001 г. с 210 до 141 т.

Спад 2001 г. оказался абсолютным и глубоким: чем ближе к производству исходных материалов по технологической цепочке стоял участник процесса, тем больше все происходящее для него напоминало коллапс. Единственным утешением стало понимание того, что «выжившие» были свидетелями завершения первого цикла развития (1994—2001 гг.) рынка арсенида галлия [1—6].

#### Получение монокристаллов арсенида галлия: LEC против VGF

GaAs используется в микро-, оптоэлектронике (эпитаксиальные слои  $A^{III}B^V$  на подложке из объемного монокристаллического GaAs) и солнечной энергетике (эпитаксиальные слои  $A^{III}B^V$  на Ge-подложке). Более 95% рынка монокристаллов GaAs составляют два типа материалов, приблизительно одинаковых по объему производства: полупроводящий

(**П**) GaAs с удельным электрическим сопротивлением  $>10^7$  Ом·см, используемый при производстве высокочастотных ИС и дискретных приборов, и сильно легированный кремнием ( $10^{17}$ — $10^{18}$  см $^{-2}$ ) GaAs с низкой плотностью дислокаций, применяемый при изготовлении СД и лазеров. Фактически это два независимых рынка, ведущих себя по-разному.

Существуют три метода промышленного производства монокристаллов GaAs:

— метод Чохральского с жидкостной герметизацией расплава слоем борного ангидрида (Liquid Encapsulated Czochralski — **LEC**);

— метод горизонтальной направленной кристаллизации в вариантах «по Бриджмену» (Horizontal Bridgman — **НВ**) или «кристаллизации в движущемся градиенте температуры» (Horizontal Gradient Freeze — **HGF**);

— метод вертикальной направленной кристаллизации в тех же двух модификациях (Vertical Bridgman — **VB**, Vertical Gradient Freeze — **VGF**).

Для ПИ-GaAs высокое удельное электрическое сопротивление обеспечивается тем, что уровень Ферми в середине запрещенной зоны закрепляется благодаря существованию глубокого донорного центра, известного как EL2 и связанного с собственными антиструктурными дефектами As<sub>Ga</sub>. Роль компенсирующих мелких акцепторов выполняют атомы фонового примеси углерода и антиструктурные дефекты As<sub>Ga</sub>.

Монокристаллы GaAs, сильно легированного Si, помимо высокой проводимости, должны обладать низкой плотностью дислокаций из-за известного эффекта деградации светоизлучающих структур вследствие генерации дислокаций в активных областях приборов. Пригодными для производства СД считаются монокристаллы с плотностью дислокаций  $N_D < 10^4$  см $^{-2}$ , а для создания лазеров — с  $N_D < 2 \cdot 10^3$  см $^{-2}$ .

Метод LEC остается одним из основных в производстве GaAs уже более 40 лет. Основной вариант технологии LEC — мощный процесс синтеза GaAs и выращивания монокристалла в установках высокого давления (60—70 атм. при синтезе и 20—30 атм. при выращивании). Для обеспечения необходимых электрофизических параметров используют галлий и мышьяк чистотой не менее 6N—7N, тигли из пиролитического нитрида бора и управление содержанием фонового углерода активными (контроль содержания CO в атмосфере) и пассивными (влажность борного ангидрида) методами. Важная особенность метода заключается в достаточно больших осевых и радиальных градиентах температуры в ходе выращивания вблизи фронта кристаллизации. Следствием этого является высокая плотность дислокаций ( $N_D$  от  $1 \cdot 10^4$  до  $2 \cdot 10^5$  см $^{-2}$ ). Типичные значения диаметров выращиваемых слитков составляют 100—150 мм, появились также коммерческие кристаллы диаметром 200 мм (впервые предложены «Friburger Compound Materials» в 2000 г.).

Методы горизонтальной и вертикальной направленной кристаллизации применяют для получения монокристаллов GaAs с низкой плотностью дислокаций. Кристаллизация материала непосредственно в контейнере освобождает от необходимости поддер-

живать большие градиенты для формообразования кристалла. Главной тенденцией стало повсеместное внедрение в промышленное производство метода вертикальной направленной кристаллизации (**ВНК**). Этим методом возможно получение как легированных монокристаллов GaAs(Si) с низкой плотностью дислокаций, так и нелегированного ПИ-GaAs. Рост в условиях низких градиентов температуры ( $\approx 1$ — $10^\circ\text{C}$ ) обуславливает также низкий уровень остаточных напряжений и большую механическую прочность кристаллов, что позволяет использовать более тонкие и дешевые пластины в производстве приборов.

При производстве ПИ-GaAs обе технологии выращивания имеют свои плюсы и минусы. Материал, полученный методом ВНК, обладает более низкой плотностью дислокаций, а LEC-материал — более однородным распределением дислокаций по площади пластины. Что касается электрически активных комплексов EL2, то в кристаллах, полученных LEC-методом, эти дефекты распределены более однородно и, как следствие, более однородно распределено удельное электрическое сопротивление по площади пластины. Кроме того, монокристаллы, выращенные методом ВНК, имеют более высокую себестоимость, чем выращенные методом LEC. Это обусловлено в 4—5 раз меньшей скоростью кристаллизации и исключением операции повторного затравления. Сравнимая совокупность характеристик, присущих различным методам выращивания, можно полагать, что в ближайшие годы оба метода будут присутствовать на рынке в приблизительно равных долях. Так, в 2004 г. немногим более 60% от общего количества продаваемого GaAs произведено методами VB и VGF, и  $\approx 40\%$  — методом LEC.

При получении монокристаллов для оптоэлектроники альтернативы технологии ВНК уже не существует: 90% мирового производства GaAs(Si) для оптоэлектроники выращивают этим методом (**табл. 2**).

Таблица 2

Применимость различных технологий выращивания GaAs

| Приборы  | Тип прибора            | Предпочтительная технология |
|--|------------------------|-----------------------------|
| Полевые транзисторы металл—полупроводник ( <b>MESFET</b> ) | Униполярный транзистор | LEC                         |
| СВЧ-транзисторы ( <b>HEMT</b> )                            | Униполярный транзистор | LEC                         |
| Транзисторы с гетеропереходом ( <b>HBT</b> )               | Биполярный транзистор  | ВНК либо LEC                |
| Лазерные и светодиоды                                      | Оптоэлектроника        | ВНК                         |

Что касается ростового оборудования, то в последние годы стал преобладать подход, при котором производители монокристаллов предпочитают сами выступать в качестве основных «идеологов» при создании оборудования, привлекая «машиностроителей» только как исполнителей своих разработок. Это привело к тому, что в отличие от промышленного производства кремния основные объемы продукции полупроводников  $A^{III}B^V$  производятся на «авторском обо-

рудования» («customized equipment»). Так, предприятие «Girmet» (г. Москва), выпускающее монокристаллы для оптоэлектроники, разработало свое оборудование для ВНК, так же предпочитает работать «Fiberger Compound Materials» (Германия) и другие компании. Производителями стандартизованного оборудования остаются американская фирма «Каух» с установкой CG850В для выращивания методом Чохральского и немецкая фирма «Crystal Growing Systems GmbH» с установкой «Kronos» для выращивания методом Бриджмена. [1, 3, 7—9].

#### Структура рынка по областям применения и перспективы развития после 2001 г.

Разделяя рынки GaAs по областям применения, можно отметить следующее.

**Микроэлектроника.** Основой для изготовления дискретных приборов и ИС служат структуры из эпитаксиальных слоев твердых растворов типа AlGaIn на подложках GaAs диаметром 100—200 мм. Именно сектор ИС для коммуникаций «ответствен» за «перегрев» рынка в 2000 г. и последующий коллапс в 2001 г. На рис. 5 после спада в 2001 г. виден подъем, складывающийся из восстановления рынка ВОЛС и рынка мобильной телефонии. Восстановление оптоволоконного рынка затянется до 2008 г. Что касается рынка сотовой телефонии, то перегрев рынка вызвало ожидание аналитиков, что потребитель, имея сотовый телефон поколения 2G, станет массово менять его на телефон поколения 3G, однако этого не произошло. Тем не менее с 2002—2003 гг. рынок мобильной телефонии начал расти и «вытягивать» из кризиса индустрию GaAs (в 2004 г. 43% всех произведенных в мире схем на основе GaAs применялись в мобильных телефонах, ожидается, что в 2008 г. этот сектор будет потреблять 33% от всех приборов на GaAs).

Из новых рынков, появившихся в последнее время, следует отметить бурно растущий рынок радаров для автомобилей. Довольно давно используемые системы круиз-контроля для дорогих автомобилей включают в себя радар, работающий на частоте 77 ГГц, который «просматривает» пространство впереди автомобиля на расстоянии до 200 м. В дополнение к этому появились системы, включающие в себя радары, работающие на частоте 24 или 77 ГГц и «просматривающие» пространство вокруг автомобиля в зоне 0,1—20 м. Объемы продаж подобных систем, для которых разработаны специальные ИС, растут (рис. 6), и этот сектор займет значительное место среди ИС широкого применения на основе GaAs.

Как следствие, оптимизм производителей кристаллов и подложек растет. «Strategy Analytics» прогнозирует рост рынка подложек ПИ-GaAs до 2007 г. (рис. 7), даже с учетом того, что цены на GaAs снижаются на 10—12% в год. Рынок подложек ПИ-GaAs в 2004 г. вырос в целом на 12% по отношению к 2003 г. [10—15].

**Оптоэлектроника.** Светодиоды. СД состоит из эпитаксиальных слоев GaAlAs, GaAsP или InGaAsP на подложке из GaAs. В секторах производства индикаторов, цифровых дисплеев и ИК-излучателей используют СД стандартной яркости, для различных подсветок (в частности — подсветки экранов мобильных те-

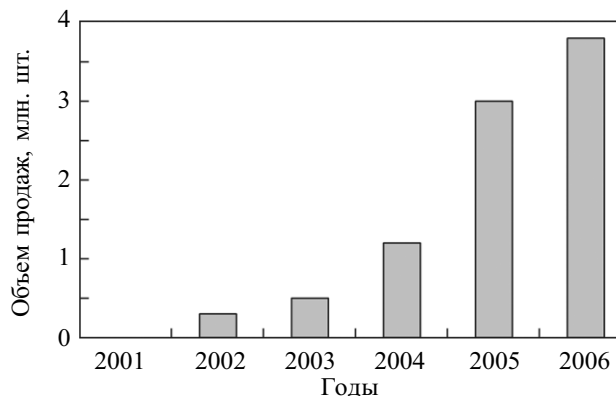


Рис. 6. Рост продаж автомобильных радарных систем

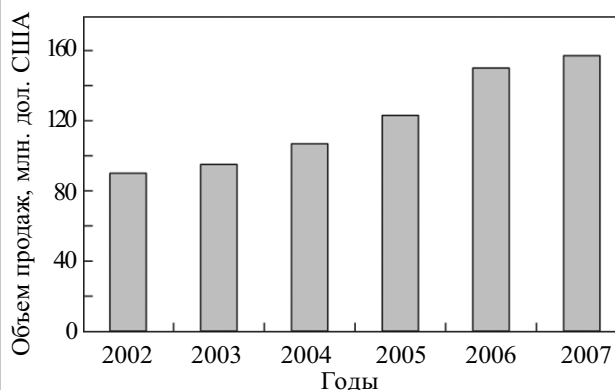


Рис. 7. Динамика рынка подложек ПИ-GaAs в 2002—2004 гг. и прогноз до 2007 г. (Источник — «Strategy Analysis»)

лефонов) — СД повышенной яркости, иллюминации, сигнальных устройств — СД сверхвысокой яркости (с интенсивностью свечения более 500 мкд). Динамика рынка различных СД в период 2001—2004 гг. и прогноз до 2008 г. приведены на рис. 8. Это самый быстрорастущий сектор среди оптоэлектронных рынков (с 1995 г. общий рост составил 350%) и менее всех подвергнувшийся спаду в 1999—2000 гг. СД повышенной яркости могут применяться, например, в светофорах. Сотня СД при токе 10 мА потребляет всего 7 Вт и может без какой-либо заметной деградации работать круглосуточно более чем в течение года, а значит, экономится примерно 800 кВт·ч в год на каждом светофоре. В США уже 8—10% всех светофоров выполнены на СД, и снижение энергозатрат на их эксплуатацию составило 80—90%, а в Стокгольме ежегодно экономят 10 млн. дол. на оплате электроэнергии для светофоров. Далее следуют автомобильный рынок (1/3 всех новых автомобилей оснащены стоп-сигналами, указателями поворота, габаритными огнями, подсветкой салона на СД), вывески, указатели и реклама [3, 8—15].

**Лазерные диоды** играют ключевую роль для устройств записи и считывания CD- и DVD-дисков, в телекоммуникационных устройствах, ВОЛС, в медицине, принтерах, лазерных маркерах, для накачки твердотельных лазеров. Лазерный диод состоит из ряда эпитаксиальных слоев GaAs, GaAlAs или InGaAsP на подложке легированного GaAs. Наиболее широко используются диоды на основе GaAlAs и InGaAsP, работающие на длинах волн 780—900 нм для CD и CD-

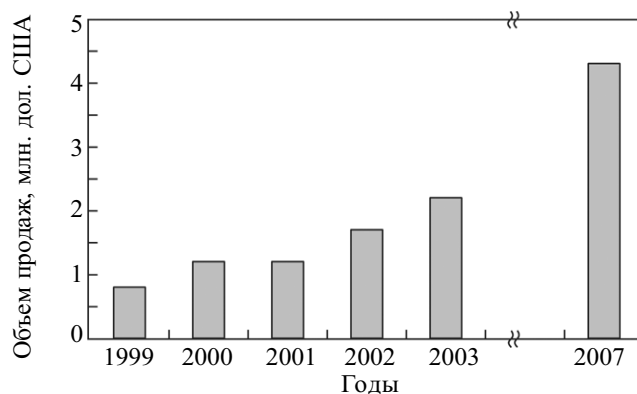


Рис. 8. Рынок СД высокой яркости в 1999—2003 гг. и прогноз до 2007 г. (Источник — «Strategies»)

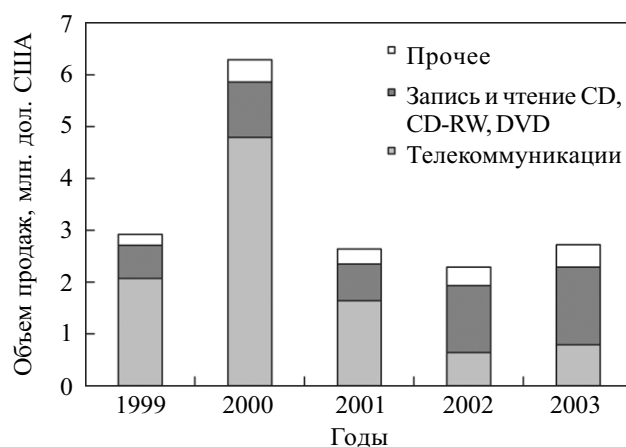


Рис. 9. Изменение рынка лазерных диодов в 1999—2003 гг. (Источник — «Strategies Unlimited»)

RW (38% общего рынка лазерных диодов) и 650 нм для DVD (29% всего рынка). Этот рынок вел себя подобно рынку микроэлектроники, испытав сильные потрясения в 2000—2001 гг. (рис. 9). В 2003 г. рынок впервые с 1999—2000 гг. начал демонстрировать восстановление, рост за 2003 г. составил 18%, рынок достиг 3,1 млрд. дол. США. Восстановление рынка уверенно продолжится: в 2004 г. рост составил 12%. По мнению «Strategies Unlimited», 2004 г. стал поворотным для рынка лазерных диодов.

#### Заключение: «Второй Манхэттенский проект — время светить»

Отдельно необходимо сказать о разработках «белых» СД для общего освещения, которое потенциально может заменить традиционные лампы накаливания и люминесцентные лампы. Существуют два подхода к созданию «белого» СД. При первом так называемый «аналоговый белый» достигается сочетанием голубого или фиолетового излучения от СД с люминофорами. В частности, первый «белый» СД был получен в 1996 г. с использованием голубого СД и желтого люминофора. При втором подходе — «цифровой белый» достигается комбинацией регулируемых потоков различных цветных СД: от дихроматических вплоть до полихроматических потоков полного спектра. Подсчитано, что только в США приблизительно 20% всего электричества (и соответственно ≈7% всей вырабаты-

ваемой энергии) тратится на освещение. Если только половина рынка освещения будет обеспечиваться «белыми» СД, то экономия энергопотребления составит  $10^6$  кВт/год, снижение издержек — 115 млрд. дол./год, снижение мощности генерирующих предприятий — 120 ГВт, а сокращение выбросов углерода — приблизительно 350 млн. т/год.

Осознав эти цифры, американцы создали федеральную программу «Next Generation Lighting Initiative» (NGLI), в которой поставлена задача создания лампы дневного света на СД с мощностью 200 лм/Вт к 2025 г. (против 30 лм/Вт сегодня). Если добиться замены к этому сроку 25—30% рынка галогенных ламп и ламп накаливания, то это даст США снижение издержек приблизительно на 40 млрд. дол./год.

С полным пониманием цены вопроса авторы программы сравнивают ее с «Манхэттенским проектом» и отмечают, что основным побочным результатом при реализации программы будет достижение технологического превосходства для государства в ряде смежных областей, важных для обеспечения национальной безопасности. Подобные государственные программы существуют в Японии («Light for 21<sup>st</sup> Century»), а также в Европе, Корее и на Тайване.

Представляется крайне актуальной подобная постановка вопроса в России. Из существовавших ранее четырех основных звеньев производства GaAs — материаловедческие исследования, промышленное производство ПИ- и легированного GaAs, производство оборудования для выращивания, производство исходных Ga и As — в настоящее время остались только исследования, производство легированного GaAs и производство Ga (As закупается в Японии). Поэтому сегодня общее состояние промышленности GaAs в России оценивается многими как близкое к «точке невозврата».

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марков А. В. // Изв. вузов. Физика. 2003. № 6. С. 5—11.
2. Shinji Komata // Hitachi Cable Rev. 2000, N 19. P. 55—58.
3. Meyer M. // Compound Semiconductor, 1999, N 5(9). P. 26—30.
4. Compound Semiconductor 06.06.03 at URL. <http://www.compoundsemiconductor.net>.
5. Compound Semiconductor 02.03.04 at URL. <http://www.compoundsemiconductor.net>.
6. Ibid 02.11.00.
7. Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников.— М.: Металлургия, 1984.—256 с.
8. Szweda R. // III—Vs Rev. 1996. V. 9. N 3. P. 230.
9. Telford M. // Ibid. 2001. V. 14. N 4. P. 54—58.
10. Whitaker T. // Compound Semiconductor. 2000. N 4(9). P. 51—57.
11. Mills A. // III—Vs Rev. 2000. V. 13, N 1. P. 35—39.
12. Corrigan W. // Compound Semiconductor. 2001, N 6(9). P. 9—10.
13. Compound Semiconductor 20.10.04 at URL. <http://www.compoundsemiconductor.net>.
14. Ibid 03.08.04.
15. Ibid 07.09.04.

В заключение автор выражает благодарность А. В. Маркову (ФГУП НИИ "Гиредмет") за помощь в написании обзора.

Л. П. ВАСИЛЬЕВА

Украина, г. Одесса, СКБ "Молния"  
E-mail: kpmo@farlep.net

Дата поступления в редакцию  
07.07 2005 г.

Оппонент В. Н. ПИК (НПП "Сатурн", г. Киев)

## СИСТЕМА СТАНДАРТИЗАЦИИ В УКРАИНЕ

*Показана важность стандартизации в решении проблем повышения качества промышленной продукции, наращивания экспортного потенциала и поддержания конкурентоспособности украинских товаров на мировом рынке.*

Значение стандартизации трудно переоценить — без нее просто невозможно существование современного общества. Стандартизация в промышленности, в том числе в электронике и в телекоммуникациях, определяет, в первую очередь, возможность создания современной техники, получения соответствующих показателей качества и надежности и, во многих случаях, возможность эксплуатации изделий вообще.

Однако стандартизация как область деятельности требует больших материальных и трудовых затрат, поддержки и совершенствования мощной инфраструктуры. Этим и объясняется сложность сохранения всех систем стандартизации в условиях спада промышленного производства, отсюда и обращение в отдельных случаях к "полумерам".

В настоящее время, когда промышленность Украины постепенно возрождается, появляется множество новых предприятий, больших и малых, в которых практически отсутствуют традиции "закоренелых" разработчиков. Здесь стандартизация стоит как бы особняком, в ней нуждаются только иногда, например, при выпуске конструкторской документации в соответствии с ЕСКД. Ситуация эта объясняется, чаще всего, двумя причинами — стремлением уменьшить затраты на проведение разработок и недооценкой стандартизации и всех преимуществ, с ней связанных.

Цель настоящего материала — составить цельное представление о системе стандартизации, сложившейся к настоящему времени в Украине, что небезынтересно для специалистов, работающих в радиоэлектронных отраслях экономики.

### Организация системы стандартизации

Стандартизация подразделяется:

— на международную, участие в которой открыто для соответствующих органов всех стран;

Открывая рубрику "Стандартизация", редакция приглашает специалистов этой важной области выступить на страницах журнала с результатами анализа, исследований, разработок.

— региональную, участие в которой открыто для соответствующих органов стран только одного географического или экономического региона;  
— национальную, которая проводится на уровне одной конкретной страны.

Соответственно и стандарты могут быть:

— международные, принятые международными организациями (ISO, IEC, ITU и др);

— региональные, принятые региональной организацией по стандартизации, в т. ч. межгосударственные (ГОСТ), принятые Межгосударственным советом по стандартизации и соответствующими органами государств, присоединившихся к Соглашению о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии, сертификации в рамках СНГ;

— принятые национальным органом по стандартизации.

Государственный стандарт Украины (ДСТУ), утвержденный Госпотребстандартом Украины, для другой страны является национальным стандартом.

Международные и региональные стандарты применяются как национальные при условии их принятия центральным органом исполнительной власти в сфере стандартизации.

Объектами национальной стандартизации в Украине являются:

а) объекты организационно-методического и общетехнического характера и назначения, в т. ч.:

— организация проведения работ по стандартизации;  
— терминологические системы в различных областях знаний и деятельности;

— классификация и кодирование технико-экономической и социальной информации;

— системы и методы обеспечения качества и контроля качества (измерений, анализа), методы испытаний;

— метрологическое обеспечение (метрологические нормы, правила, требования, организация работ);

— требования техники безопасности, гигиены труда, эргономики, технической эстетики;

— системы технической и другой документации общего применения, единый технический язык;

— системы величин и единиц;

— типоразмерные ряды и типовые конструкции изделий общемашиностроительного применения;

— информационные технологии, включая программные и технические средства информационных систем общего применения;

— достоверные справочные данные о свойствах веществ и материалов;

б) продукция межотраслевого и широкого применения;

в) составляющие элементы народнохозяйственного значения, в т. ч. банковско-финансовая система, транспорт, связь, охрана окружающей природной среды, требования к используемым природным ресурсам, оборона и т. п.;

г) объекты (элементы) государственных социально-экономических и научно-технических программ.

### Структура системы стандартизации и обозначение стандартов

Структура системы стандартизации состоит из следующих организаций:

— Госпотребстандарт Украины — осуществляет межотраслевую координацию работ по стандартизации, включая планирование, разработку, издание, распространение и применение государственных стандартов, определяет порядок государственной регистрации нормативных документов. Принимает участие в мероприятиях по международной стандартизации;

— министерства (ведомства), государственные комитеты, органы государственной исполнительной власти — принимают участие в работах по стандартизации в пределах своей компетенции;

— подразделения (службы) стандартизации в министерствах и (или) головные (базовые) организации по стандартизации;

— технические комитеты для организации и обеспечения разработки, экспертизы, согласования и утверждения государственных стандартов и других нормативных документов по стандартизации, а также для проведения работ по международной стандартизации;

— подразделения (службы) стандартизации на предприятиях — проводят научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по стандартизации, осуществляют организационно-методическое и научно-техническое руководство работами по стандартизации на предприятиях, включая и подготовку к внедрению стандартов.

Государственная система стандартизации Украины базируется на следующих стандартах:

— ДСТУ 1.0—2003 Национальная стандартизация. Основные положения;

— ДСТУ 1.1—2001 Национальная стандартизация. Стандартизация и смежные виды деятельности. Термины и определения основных понятий;

— ДСТУ 1.2—2003 Национальная стандартизация. Порядок разработки государственных стандартов;

— ДСТУ 1.3—2004 Национальная стандартизация. Порядок разработки, построения, изложения, оформления, согласования, принятия, обозначения технических условий;

— ДСТУ 1.5—2003 Национальная стандартизация. Правила построения, изложения, оформления и требования к содержанию нормативных документов;

— ДСТУ 1.6—2004 Национальная стандартизация. Правила регистрации нормативных документов;

— ДСТУ 1.7—2001 Национальная стандартизация. Правила и методы принятия и применения международных и региональных стандартов;

— ДСТУ 1.8—2004 Национальная стандартизация. Правила разработки программ работ по стандартизации;

— ДСТУ 1.9—2004 Национальная стандартизация. Правила разработки и внедрения межгосударственных стандартов;

— ДСТУ 1.10—2004 Национальная стандартизация. Государственные классификаторы социально-экономической информации. Основные положения, правила разработки, внедрения и отмены;

— ДСТУ 1.11—2004 Национальная стандартизация. Правила проведения экспертизы проектов национальных нормативных документов;

— ДСТУ 1.12—2004 Национальная стандартизация. Правила ведения дел нормативных документов;

— ДСТУ 1.13—2001 Национальная стандартизация. Правила представления сообщений торговым партнерам Украины.

Принята следующая структура обозначения стандартов Украины — обозначение стандарта состоит из индекса, регистрационного номера и отделенных тире двух последних цифр года утверждения стандарта. (В обозначении стандартов, принятых после 01.10 1999 г., год утверждения указывается полностью.) Для ДСТУ в обозначении стандарта, входящего в комплекс стандартов, в его регистрационном номере первые цифры с точкой означают систему или комплекс стандартов, а цифры после точки — порядковый номер стандарта в системе или комплексе.

Нормативные документы по стандартизации делятся на категории:

— государственные стандарты Украины (ДСТУ);

— отраслевые стандарты Украины (ГСТУ);

— стандарты научно-технических и инженерных обществ и союзов Украины (СТТУ);

— технические условия Украины (ТУ У);

— стандарты организации (СОУ).

Ниже приведены применяемые в Украине категории стандартов и их индексы:

— государственные стандарты Украины (ДСТУ);

— государственные стандарты Украины, посредством которых внедрены стандарты ISO (ДСТУ ISO, ДСТУ ISO/IEC, ДСТУ ISO/IEC TR);

— государственные стандарты Украины, посредством которых внедрены стандарты IEC (ДСТУ IEC, ДСТУ IEC QC);

— государственные стандарты Украины, посредством которых внедрены европейские стандарты (ДСТУ EN, ДСТУ prEN, ДСТУ ENV);

— государственные стандарты Украины, посредством которых внедрены стандарты UN/ECE (ДСТУ UN/ECE);

— государственные стандарты Украины, посредством которых внедрены стандарты ANSI (ДСТУ ANSI);

— государственные стандарты Украины, посредством которых внедрены стандарты IEEE (ДСТУ IEEE);

— государственный стандарт Украины в отрасли строительства (ДСТУ Б);

— республиканский стандарт бывшего СССР (РСТ УРСР, РСТ УССР) — применяют в качестве государственных стандартов Украины до их замены либо отмены;

— отраслевые стандарты Украины (ГСТУ);

— технические условия (ТУ);

— межгосударственные стандарты (ГОСТ);

- отраслевые стандарты бывшего СССР (ОСТ);
- руководящие нормативные документы (КНД);
- рекомендации (Р);
- государственные классификаторы (ДК).

Здесь ISO — Международная организация по стандартизации; IEC — Международная электротехническая комиссия; ISO/IEC — совместный комитет международных организаций ISO и IEC;

ISO/TR, ISO/IEC TR — технический отчет ISO или ISO/IEC; EN — европейский стандарт; ENV — экспериментальный европейский стандарт; prEN — проект европейского стандарта; ANSI — Американский национальный институт стандартов; IEEE — Институт инженеров электротехнической и электронной промышленности США; UN/ECE — правила Европейского Экономического комитета.

### Международное сотрудничество

Госпотребстандарт Украины в соответствии с действующим законодательством Украины и международными договорами, ратифицированными Украиной, представляет национальные интересы в международных и региональных организациях по стандартизации, а также в отношениях с соответствующими организациями других стран в сфере стандартизации.

Сотрудничество Украины с международными организациями включает в себя участие в разработке международных, межгосударственных и региональных стандартов, участие в выработке программ работ и т. д.

Основными задачами международного научно-технического сотрудничества Украины в области стандартизации являются:

- сближение и гармонизация государственной системы стандартизации Украины с международной и региональными системами, прогрессивными национальными системами стандартизации других стран;
- совершенствование и развитие фонда нормативных документов Украины;
- проведение целенаправленной научно-технической и экономической политики путем разработки международных и региональных стандартов на основе стандартов Украины на новые конкурентоспособные виды продукции и услуг;
- решение проблем классификационной, терминологической и информационной совместимости стандартов;
- обеспечение защиты интересов Украины при разработке стандартов;
- обеспечение единства измерений;
- обеспечение взаимного признания результатов испытаний и сертификации продукции.

В области электроники и телекоммуникаций наиболее влиятельной является ISO — всемирная федерация национальных органов стандартизации (комитетов-членов ISO). Международные стандарты разрабатывают, как правило, технические комитеты ISO. Каждый комитет-член, заинтересованный в предметной отрасли деятельности, для которой был организован технический комитет, имеет право быть представленным в этом комитете.

Международные правительственные и неправительственные организации, которые взаимодействуют с

ISO, также принимают участие в работах. По всем вопросам стандартизации в области электроники ISO тесно сотрудничает с Международной электротехнической комиссией (IEC), Международным телекоммуникационным союзом (ITU) и др.

Международные стандарты разрабатываются согласно правилам, изложенным в Директивах ISO/IEC, часть 3.

Принятые техническими комитетами проекты международных стандартов рассылают комитетам-членам на голосование. Опубликование их как международных стандартов требует одобрения не менее 75% комитетов-членов, принимающих участие в голосовании.

Существующая практика гармонизации национальных стандартов с международными обеспечивает доступ продукции украинских товаропроизводителей на мировой рынок, их участие в международной производственной кооперации. Национальный стандарт, гармонизированный с международным, является идентичным переводом международного стандарта. В гармонизированный национальный стандарт вносятся некоторые редакционные изменения: заменяется термин “международный стандарт” на “государственный стандарт” и вводятся ссылки на государственные стандарты Украины, в свою очередь, гармонизированные с международными.

Вопросами гармонизации занимается научно-исследовательский институт метрологии измерительных и управленческих систем “Система” совместно с Техническими комитетами стандартизации по соответствующему направлению деятельности (например, по системам качества — ТК 93 “Управление качеством и обеспечение качества”).

### Роль стандартизации в повышении качества электронных средств

В условиях роста глобализации рынков товаров и услуг большое внимание уделяется вопросам повышения качества продукции. Для дальнейшего наращивания экспортного потенциала и поддержания конкурентоспособности продукции должны выполняться, по крайней мере, два условия: гармонизация национальных стандартов с международными и европейскими и внедрение и усовершенствование систем управления качеством на предприятиях Украины [1].

Национальным комитетом Украины ТК 93 “Управление качеством и обеспечение качества” изданы следующие гармонизированные стандарты Украины:

- ДСТУ ISO 9000—2001 Системы управления качеством. Основные положения и словарь;
- ДСТУ ISO 9001—2001 Системы управления качеством. Требования;
- ДСТУ ISO 9004—2001 Системы управления качеством. Указания по улучшению деятельности;
- ДСТУ ISO 14001—97 Системы управления окружающей средой. Состав и описание элементов и указания по их применению;
- ДСТУ ISO 10011-1—97 Указания для проверки систем качества. Часть 1. Проверка;
- ДСТУ ISO 10011-2—97 Указания для проверки систем качества. Часть 2. Квалификационные требования к аудиторам по системам качества;
- ДСТУ ISO 10011-3—97 Указания для проверки систем качества. Часть 3. Управление программами проверок.

Стандарты ISO, с которыми гармонизированы вышперечисленные государственные стандарты Украи-

ны, разработаны техническим комитетом ISO/TC 176 “Управление качеством и обеспечение качества” (подкомитет SC1 “Понятия и терминология”, подкомитет SC2 “Системы качества”).

Стандарты серии ISO 9000, распространенные во всем мире, создали предпосылки для формирования единого подхода, единого языка при заказе, поставке и эксплуатации продукции, ее оценке и сертификации. Следует заметить, что со времен СССР расхождения в стандартах сдерживали распространение отечественной продукции (например авиационной техники), несмотря на то, что по эксплуатационно-техническим характеристикам она находилась на переднем крае мирового развития.

Внедрение стандартов системы ISO 9000 позволяет:

- установить и регламентировать ответственность исполнителей всех уровней за качество продукции;
- сократить внутрицеховые затраты на качество за счет внедрения соответствующих технологических процессов и оснащения их средствами производства;
- уменьшить затраты на несоответствующую продукцию за счет разработки и внедрения регулирующих и предупредительных мер и проведения контроля материалов и готовых изделий во время закупки;
- повысить квалификацию и профессионализм исполнителей посредством их обучения и аттестации [2].

К примеру, успешно внедрена система управления качеством серии ISO 9000 на Харьковском государственном авиационном предприятии, а головной организацией по стандартизации Минпромполитики Украины “Информационные технологии” является Национальный авиационный университет.

Государственной программой развития авиационной промышленности Украины до 2010 года предусматривается выполнение целого комплекса научно-исследовательских работ по формированию современной нормативной базы прямым внедрением стандартов международных организаций и гармонизацией действующих нормативных документов с аналогичными документами международных организаций (ISO, IEC, ITU, ICAO — европейский межрегиональный центр) [1].

#### Межгосударственная стандартизация

Важное место в системе стандартизации Украины занимает межгосударственная стандартизация среди стран СНГ. Это вполне естественно, т. к. стандартизация в них базируется на общей системе и на общих стандартах и подходах, которые были разработаны и освоены в СССР. На сегодняшний день отечественная промышленность работает, в основном, по отраслевым стандартам бывшего СССР, общая численность которых — около 25 тысяч [3].

Работы по межгосударственной стандартизации проводятся в соответствии с Соглашением о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации (Москва, 13.03.92-12/1) и представляют собой стандартизацию объектов, представляющих межгосударственный интерес.

Межгосударственный стандарт (ГОСТ) — стандарт, принятый Межгосударственным советом по стандар-

тизации, метрологии и сертификации или Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации. В Межгосударственный совет по стандартизации (посредством своих национальных органов по стандартизации, например, в Украине — Госпотребстандарт) входят: Азербайджан, Армения, Беларусь, Грузия, Казахстан, Киргизия, Молдова, Россия, Таджикистан, Туркменистан, Узбекистан, Украина.

Основные принципы межгосударственной стандартизации:

- взаимное стремление всех заинтересованных государств-участников Соглашения к достижению согласия по обеспечению качества взаимопоставляемой продукции;
- целесообразность разработки межгосударственного стандарта, учитывающая его социальную, экономическую, техническую необходимость и приемлемость для применения государствами-участниками Соглашения;
- обеспечение гармонизации межгосударственных стандартов с международными и региональными стандартами;
- пригодность межгосударственных стандартов в целях сертификации продукции и услуг;
- комплексность стандартизации взаимосвязанных объектов путем согласования требований к этим объектам и увязки сроков введения в действие нормативных документов по стандартизации;
- обеспечение соответствия межгосударственных стандартов современным достижениям науки, техники и передового опыта.

Принятие приоритетных направлений и форм межгосударственного сотрудничества по реализации согласованной политики в области стандартизации осуществляет Межгосударственный совет по стандартизации. Решения, принятые Межгосударственным советом, национальные органы по стандартизации государств-участников Соглашения реализуют соответствующими организационно-распорядительными документами.

Для решения задач по организации и координации работ по межгосударственной стандартизации Межгосударственный совет после обсуждения с национальными органами по стандартизации принимает правила по межгосударственной стандартизации (ПМГ) и рекомендации по межгосударственной стандартизации (РМГ).

Все правила проведения работ по межгосударственной стандартизации, основные положения, принципы и т. п. изложены в межгосударственных стандартах:

- ГОСТ 1.0—92 Правила проведения работ по межгосударственной стандартизации. Общие положения;
- ГОСТ 1.2—97 Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные. Правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Порядок разработки, принятия, применения, обновления и отмены;
- ГОСТ 1.5—2001 Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные. Правила и рекомендации по межгосударственной стандар-

тизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению.

Разработан и издан также государственный стандарт Украины, гармонизированный с межгосударственным стандартом:

— ДСТУ ГОСТ 1.5—2001 Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные. Правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению.

Необходимо также отметить, что основополагающими и широко применяемыми в странах СНГ при разработке конструкторской (КД), технологической (ТД) и программной (ПД) документации являются комплексы межгосударственных стандартов ЕСКД, ЕСТД и ЕСПД. Они отвечают всем потребностям в нормативной базе при разработке документации и содержат единые требования и правила, что позволяет достичь единообразия в изображениях, понятиях, терминологии и т. п.

В обозначение КД, ТД и ПД, кроме других структурных элементов, входит код организации-разработчика, состоящий из четырех прописных букв, например, КМИС, КУСВ и т. п. Организация, которая присваивает эти коды организациям-разработчикам, — Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт городского хозяйства, входящий в Госкомитет по вопросам жилищно-коммунального хозяйства.

Электротехническая и электронная промышленность работают также со стандартами отраслевого уровня — 4000 ОСТ, РД, РТМ, уровень актуализации которых в Украине отстает от внедрения в России. Частично этот вопрос решается в рамках отраслевого нормативного документа “Порядок проведения аттестации производства и сертификации систем качества украинских предприятий — производителей электрорадиоизделий, радиоэлектронной аппаратуры военного назначения и материалов к ним”. Этот нормативный документ гармонизирован с требованиями международных стандартов серии ISO 9000, комплексом стандартов “Климат-7” и документами системы “Военэлектронсерг”. Но данный документ не решает проблем, касающихся внедрения в Украине комплекса стандартов “Климат-7” и “Мороз-6”, разработанных в России. Это касается и стандартов системы разработки и постановки продукции на производство, которые в России тоже пересмотрены [1].

Актуализация — это приведение действующих нормативных документов в соответствие с современными требованиями, нормами и правилами, действующими как в странах СНГ, так и в международной стандартизации. Актуализированные в РФ документы (как отраслевого, так и государственного уровня) в Украину не поступают — новые наработанные стандарты Россия не выносит на заседания Межгосударственного совета по стандартизации стран СНГ для принятия их как региональных — межгосударственных стандартов для свободного применения в странах СНГ (в связи с реорганизацией Госстандарта России) [1].

Таким образом, наряду с необходимостью наработки национальных стандартов на продукцию промышленности, гармонизированных с международными и европейскими, весомой составляющей качества промышленной продукции является актуализация действующей нормативной базы и упорядочение ее применения в странах СНГ.

### Информационное обеспечение

Информационное обеспечение осуществляется посредством издания различных каталогов, указателей, классификаторов, бюллетеней. Центральный орган исполнительной власти в сфере стандартизации через национальный информационный фонд нормативных документов и национальный центр международной информационной сети ISONET WTO обеспечивает информацией отечественных и зарубежных пользователей.

Издаются:

- каталог “Стандарты Украины”, включающий дополнительный алфавитный каталог;
- каталог “Межгосударственные стандарты”;
- алфавитный каталог “Межгосударственные стандарты”;
- каталог “Метрология и измерения”;
- каталог технических условий Украины;
- каталог ТУ, РД, РТМ бывшего СССР, утвержденных до 1992 года;
- каталог отраслевых стандартов и приравненных к ним других нормативных документов бывшего СССР, которые применяются в отрасли связи Украины;
- ежемесячный информационный каталог “Стандарты”, включающий информацию об изменениях, введении и отмене стандартов;
- ежемесячные информационные бюллетени по стандартизации Минпромполитики Украины;
- каталог информационных продуктов научно-информационного центра “Леонорм”, который содержит информацию об издаваемых каталогах, сборниках стандартов по направлениям техники, по отраслям и т. п.;
- каталог стандартов Международной организации по стандартизации (ISO);
- каталог стандартов Международной электротехнической комиссии (IEC);
- каталог директив ЕС и т. п.

Изданы классификаторы:

- ДК 001—2004 Классификация форм собственности;
- ДК 002—2004 Классификация организационно-правовых форм хозяйствования;
- ДК 003—95 Классификатор профессий (КП);
- ДК 004—2003 Классификатор нормативных документов (УКНД);
- ДК 005—96 Классификатор отходов;
- ДК 006—96 Классификатор валют;
- ДК 007—96 Классификатор государств мира;
- ДК 008—96 Классификатор полезных ископаемых и подземных вод;
- ДК 009—96 Классификатор видов экономической деятельности;
- ДК 010—98 Государственный классификатор управленческой документации (ДКУД);
- ДК 011—96 Классификатор системы обозначений единиц измерения и счета (КСПОВО);
- ДК 012—97 Государственный классификатор Украины. Классификация услуг внешнеэкономической деятельности (КПЗЕД);
- ДК 013—97 Государственный классификатор основных фондов (КОФ);

— ДК 014—97 Классификатор объектов административно-го устройства Украины (КОАТУУ);  
 — ДК 015—97 Государственный классификатор Украины. Классификация научно-технической деятельности (КВНТД);  
 — ДК 016—97 Государственный классификатор продукции и услуг (ДКПП);  
 — Алфавитный указатель к государственному классификатору продукции и услуг ДК 016—97.

Для улучшения взаимодействия организаций и предприятий СНГ, разрабатывающих, производящих и эксплуатирующих авиационную технику, в рамках Межгосударственного совета было принято Соглашение о взаимном применении Стандартов СССР. С этой целью в ОАО “УкрНИИАТ” были разработаны следующие документы:

— Каталог отраслевых стандартов бывшего СССР, утвержденных до 1992 года;  
 — Каталог технических условий (ТУ), руководящих документов (РД) и руководящих материалов (РТМ) бывшего СССР, утвержденных до 1992 г., которыми пользуются предприятия и организации Минпромполитики Украины;  
 — Каталог технических условий (ТУ), руководящих документов (РД) и руководящих материалов (РТМ) бывшего СССР, утвержденных Всесоюзным научно-исследовательским институтом до 1992 г., которыми пользуются предприятия и организации Минпромполитики Украины.

С целью совместной актуализации ОСТ, РД, РТМ бывшего СССР институтом “УкрГосНИИСС” (г. Николаев) разработаны следующие перечни:

— Перечень отраслевых руководящих документов (РД) бывшего СССР, применяемых предприятиями судостроительной отрасли;  
 — Перечень отраслевых стандартов бывшего СССР, утвержденных до 1992 г., которые применяются предприятиями судостроительной отрасли.

### Особенности развития системы стандартизации в Украине

Основным техническим барьером в международной торговле являлись расхождения в требованиях, установленных к одинаковой продукции в разных странах. Источники расхождений в стандартизации между европейской и украинской национальной системами лежат в истории европейских стран и бывшего СССР. Система стандартизации в СССР была достаточно развита, стандарты охватывали все отрасли. Разработанные в 1970-х и 1980-х годах стандарты отображали уровень развития промышленности того периода. Часть этих стандартов применяется в Украине до сих пор.

После распада СССР перед вновь образовавшимися государствами встала задача организации собственных систем стандартизации.

В Украине развитие системы стандартизации ведется в нескольких направлениях:

— гармонизация национальных стандартов с международными, что обеспечивает доступ продукции украинских товаропроизводителей на мировые рынки;  
 — развитие национальной стандартизации;  
 — участие в межгосударственной стандартизации стран СНГ;  
 — непосредственное применение международных стандартов.

Сегодня в ЕС действуют 11 тысяч стандартов, сотни директив, которые устанавливают основные требования к продукции и методам испытаний. В сфере технического урегулирования Украина должна внедрить более 8000 евро норм и более 90 директив. Предусматривается разработка более 1200 гармонизированных национальных стандартов [1].

Изготовленная в соответствии с такими стандартами промышленная продукция будет отвечать основным требованиям международного рынка. Поэтому промышленность должна нарабатывать национальные стандарты, гармонизированные с международными, которые должны функционировать наряду с действующей нормативной базой. Минпромполитики Украины разместило государственный заказ на разработку 54 таких стандартов и одновременную актуализацию 100 действующих нормативных документов [1].

Характеризуя научно-технический уровень промышленных стандартов, следует отметить, что на национальном уровне преобладают межгосударственные (ГОСТ) и отраслевые (ОСТ) стандарты бывшего СССР, основная часть которых не пересматривалась в течение 10 лет и разработки которых в своем большинстве находятся за пределами Украины.

Анализ действующей нормативной документации, которой пользуются предприятия и организации промышленности, свидетельствует, что уровень ее не отвечает современным требованиям и требует немедленного пересмотра и актуализации. Прежде всего необходимо акцентировать внимание на отраслевых стандартах (ОСТ) бывшего СССР, по которым выпускается продукция.

Такие отрасли, как электронная, тесно связаны с соответствующими отраслями России и других стран СНГ. Продукция этой отрасли выпускается по одним и тем же нормативным документам, разработанным много лет назад. Но на данный момент нет соглашений на уровне правительств или национальных органов стандартизации о совместной их актуализации и применении [1].

Наряду с актуализацией имеющейся нормативной базы проводятся работы по разработке национальных промышленных стандартов, согласованных с международными нормами и правилами.

В соответствии с законом Украины “О стандартизации” (2001 г.) имущественные права на государственные стандарты Украины принадлежат Госпотребстандарту Украины, который поручил распространение стандартов Украинскому научно-исследовательскому и учебному центру проблем стандартизации, сертификации и качества. В фонде нормативных документов Центра есть государственные и межгосударственные стандарты, а также стандарты ИЕС и ЕН. Нормативных документов, касающихся информационных и телекоммуникационных технологий, в фонде нет. Это — специфические стандарты, такие как стандарты Европейского института стандартизации в отрасли телекоммуникаций (ETSI), Международного союза телекоммуникаций (ITU), федеральной комиссии связи США (FCC), которые не имеют отечественных аналогов [4].

**Организации, издающие каталоги и осуществляющие информационное обеспечение**

Научно-информационный центр “Леонорм”, г. Львов (mark@leonorm.lviv.ua, http://www.leonorm.com.ua).

Научно-технический центр “Леонорм-Стандарт”, г. Киев (instandard@ukr.net).

Национальный авиационный университет, г. Киев (infotec@nau.edu.ua).

Украинский научно-исследовательский институт авиационной технологии ОАО “УкрНИИАТ” г. Киев (cmti@ukrniat.com, каталоги нормативных документов бывшего СССР, утвержденных до 1992 г).

Госпотребстандарт Украины, г. Киев (bni2001@ukr.net, тел. (044) 226-29-71).

Украинский научно-исследовательский и учебный центр проблем стандартизации, сертификации и качества, г. Киев (sekretar@ukrinduc.org.ua).

Украинский научно-производственный центр по стандартизации, метрологии и информации, г. Киев (тел. (044) 450-38-79, каталог ТУ Украины).

Научно-технический центр “Евроконтакт”, г. Киев (bni2001@ukr.net), (перечни ОП — перечни электрорадиоизделий, рекомендуемых для применения при разработке и модернизации аппаратуры народнохозяйственного назначения, издаваемые НПП “Циклон-тест”, Россия).

НИИ “Центр” (головная организация по классификации, каталогизации и кодированию), г. Николаев (тел. (0512) 34-00-98, государственные каталоги продукции).

Отдел стандартизации Минпромполитики Украины, г. Киев (тел. (044) 246-30-11).

Государственная научно-техническая библиотека, г. Киев (тел. (044) 261-00-79, 261-00-14, 268-23-24).

Магазин стандартов, г. Киев (тел. (044) 435-42-70, 435-22-30).

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Неустроев О. Л. Перехід до міжнародних і європейських стандартів у галузі промисловості — шлях цивілізованого входження України до світової організації торгівлі з метою підвищення якості життя // Інформаційний бюлетень Минпромполитики України з стандартизації, метрології та управління якістю.— 2004.— № 1. — С. 2—4.

2. Науменко П. О. Упровадження міжнародних стандартів ISO 9001:2000 і сертифікація систем управління якістю на Харківському державному авіаційному виробничому підприємстві // Там же.— С. 12.

3. Зубарев В. В. Розширення співпраці з Європейським фондом управління якістю — шлях подальшої інтеграції промисловості України до світового співтовариства // Там же.— 2004.— № 2.— С. 8.

4. Душенко Г. О. Проблеми стандартизації в галузі електромагнітної сумісності в Україні // Там же.— 2005.— № 2.— С. 21.

**ЖУРНАЛИ В ПОДПИСНИХ КАТАЛОГАХ**

- ✓ **Биомедицинские технологии и радиоэлектроника**
- ✓ **Вопросы радиоэлектроники**
- ✓ **Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники**
- ✓ **Известия высших учебных заведений. Приборостроение**
- ✓ **Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника**
- ✓ **Известия высших учебных заведений. Электроника**
- ✓ **КИП и автоматика**
- ✓ **Нано- и микросистемная техника**
- ✓ **Производство электроники**
- ✓ **Силовая электроника**
- ✓ **Схемотехника**
- ✓ **Технологии приборостроения**
- ✓ **Технология и конструирование в электронной аппаратуре**
- ✓ **Успехи современной радиоэлектроники**
- ✓ **Chip news / Инженерная микросистемная электроника**
- ✓ **Chip news. Украина / Новости о микросхемах. Инженерная микросистемная электроника**
- ✓ **Электроника: Наука, Технология, Бизнес**
- ✓ **Электронная промышленность**
- ✓ **Электронные компоненты**
- ✓ **Электронные компоненты и системы**
- ✓ **Электронные компоненты. Украина**



Специализированная выставка-форум  
с международным участием  
по современной электронике  
для транспорта и транспортных коммуникаций

# Электроника Транспорт 2006

**20—22 февраля 2006 года**

Москва, Центр международной торговли  
Краснопресненская набережная, д.12

[www/chipexpo.ru/transport](http://www/chipexpo.ru/transport)  
e-mail: [transport@chipexpo.ru](mailto:transport@chipexpo.ru)  
тел./факс: (495) 368-1039

Издательский дом «Мир Электроники»  
представляет новый проект

Первый украинский  
полномасштабный отраслевой каталог

**«ЭЛЕКТРОНИКА УКРАИНЫ – 2006»**

ежегодное  
информационно-справочное  
издание

Тел. (044)442-20-67  
[ec@optima.com.ua](mailto:ec@optima.com.ua)

# Е·Х·Р·О ELECTRONICA



ufi  
Approved  
Event



9-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ  
ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Совместно с:

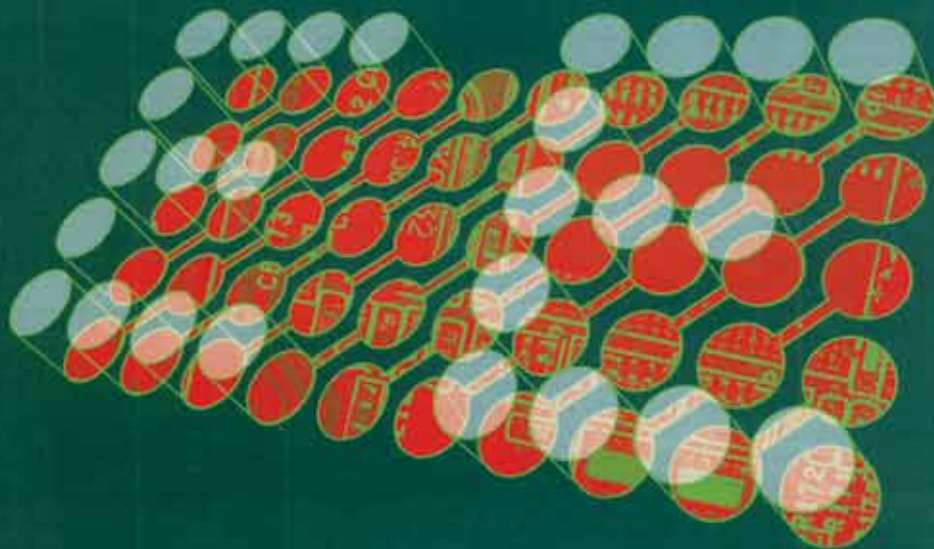
expo  
**Electrontech**

4-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ  
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

## 25-28 АПРЕЛЯ 2006

РОССИЯ, МОСКВА  Крокус Экспо

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР



Организаторы:

 PRIMEXPO



При содействии:



Тел.: +7(812)380 6007/03/00

Факс: +7(812)380 6001

E-mail: [electron@primexpo.ru](mailto:electron@primexpo.ru)



[www.expoelectronica.ru](http://www.expoelectronica.ru)

[www.electrontechexpo.ru](http://www.electrontechexpo.ru)

Пишите

Подписывайтесь

Читайте



Номер готовили

Винница, Киев, Львов, Минск, Москва,  
Одесса, Санкт-Петербург, Фрязино,  
Харьков, Хмельницкий, Черновцы.