

# ТРА

## ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

К статье «Электрические соединители  
для поверхностного непаяного монтажа»



# 4 2012

ИЮЛЬ — АВГУСТ

**Издательство «Политехпериодика»**



E-mail: [tkea@optima.com.ua](mailto:tkea@optima.com.ua), web-сайт: [www.tkea.com.ua](http://www.tkea.com.ua)

Login Skype: politehperiodika, тел. +38 (048)728-18-50, тел./факс 728-49-46

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

ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

Зарегистрирован в ВАК Украины по разделам «Физико-математические науки», «Технические науки»

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев) и в Реферативном журнале ВИНТИ (г. Москва)

## ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ



## В Украине

Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.

Подписное агентство «Идея», [www.idea.com.ua](http://www.idea.com.ua). Индекс 11146.

Подписное агентство «KSS», [www.kss.kiev.ua](http://www.kss.kiev.ua). Индекс 20363.

## В России

Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.

## В Белоруссии

Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ».

Индекс 71141.

В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.

Адрес редакции: Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17.

E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua.

тел. +38 (048)728-18-50.

тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко.

А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корсукая.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Номер выпущен при поддержке  
ЗАО «Украналит» (г. Киев),  
НПП «Карат» (г. Львов),  
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

Подписано к печати 30.08 2012. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 6,5+1,0. Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 250 экз. Заказ № 224.

Издательство «ПолитехперIODика»

(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии ПА «ART-V»

(65091, г. Одесса, ул. Комитетская, 24а).



**ТЕХНОЛОГИЯ  
И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ  
В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2012

№ 4

Год издания 36-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*К.т.н. В. М. Чмиль*

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

*Д.т.н. Н. М. Вакив* (г. Львов)  
*Д.т.н. В. Н. Годованюк* (г. Черновцы)  
*К.т.н. А. А. Дашковский* (г. Киев)  
*Н. В. Кончиц* (г. Киев)  
*Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин* (г. Киев)  
*Д.т.н. Г. А. Оборский* (г. Одесса)  
*Е. А. Тихонова* (г. Одесса)

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

*Д.т.н. С. Г. Антошук* (г. Одесса)  
*Д.т.н. А. А. Ащеулов* (г. Черновцы)  
*Д.т.н. В. В. Баранов* (г. Минск)  
*К.т.н. Э. Н. Глушеченко*,  
зам. гл. редактора (г. Киев)  
*Д.т.н. В. В. Данилов* (г. Донецк)  
*К.т.н. И. Н. Еримичой*,  
зам. гл. редактора (г. Одесса)  
*К.т.н. А. А. Ефименко*,  
ответственный секретарь (г. Одесса)  
*Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк* (г. Киев)  
*Д.т.н. С. Ю. Лузин* (г. С.-Петербург)  
*Д.т.н. В. П. Малахов* (г. Одесса)  
*К.т.н. И. Л. Михеева* (г. Киев)  
*Д.т.н. И. Ш. Невлюдов* (г. Харьков)  
*Д.т.н. Ю. Е. Николаенко* (г. Киев)  
*К.ф.-м.н. А. В. Рыбка* (г. Харьков)  
*К.т.н. В. В. Рюхтин* (г. Черновцы)  
*Д. ф.-м. н. М. И. Самойлович*  
(г. Москва)  
*Д.т.н. В. С. Ситников* (г. Одесса)  
*Д. т. н. Я. Стеванович* (г. Белград)  
*Д. т. н. З. Стевич* (г. Белград)  
*Д.х.н. В. Н. Томашик* (г. Киев)  
*Д.т.н. В. М. Шокало* (г. Харьков)  
*Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк* (г. Львов)

**УЧРЕДИТЕЛИ**

Министерство промышленной полити-  
ки Украины  
Институт физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарёва  
Научно-производственное  
предприятие «Сатурн»  
Одесский национальный  
политехнический университет  
Издательство "Политехпериодика"

Одобрено к печати Ученым советом  
ОНПУ  
(Протокол № 1 от 30.08 2012 г.)

**СОДЕРЖАНИЕ**

**Техническая политика**

Мировые тенденции развития микроэлектроники и место Рес-  
публики Беларусь в этом процессе. *Белоус А. И., Пилипенко*  
*В. А., Турцевич А. С., Шведов С. В.* 3

**Новые компоненты для электронной аппаратуры**

Электрические соединители для поверхностного непаяного  
монтажа. *Ефименко А. А.* (на английском языке) 9

**Электронные средства: исследования, разработки**

Формализованные показатели для оценки качества радиотехни-  
ческих систем охраны периметров объектов. *Колесник К. В.,*  
*Кипенский А. В., Мачехин Ю. П., Чурюмов Г. И.* 16

**Системы передачи и обработки сигналов**

Синхронизация потоков данных в многоканальных системах  
ЦОС с перестраиваемой структурой. *Шейк-Сейкин А. Н.* 20

**Материалы электроники**

Широкозонные халькогенидные сцинтилляторы на основе  
соединений  $A^{IV}B^{VI}$ . *Старжинский Н. Г., Гринёв Б. В., Рыжи-*  
*ков В. Д., Малюкин Ю. В., Жуков А. В., Сидлецкий О. Ц.,*  
*Зеня И. М., Лалаянц А. И.* 25

Прогноз диэлектрических потерь в стеклокерамике для раз-  
ных соотношений массовых долей компонентов. *Дмитриев*  
*М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И.* 29

**Функциональная микро- и нанoeлектроника**

Исследование температурной зависимости контактного сопро-  
тивления омических контактов к InP. *Новицкий С. В.* 32

Индуктивность, электрически перестраиваемая полупроводнико-  
вой структурой. *Семенов А. А., Усанов Д. А., Колокин А. А.* 35

Схемотехника СБИС для микроэлектронного координатно-  
чувствительного детектора для элементного анализа материа-  
лов. *Сидоренко В. П., Вербицкий В. Г., Прокофьев Ю. В.* 39

**Сенсоэлектроника**

Эффективность сбора зарядов в датчиках  $\gamma$ -излучения с раз-  
личной конфигурацией электродов. *Кондрик А. И.* 47

**Список рецензентов номера** 52

**Новые книги** 15, 24, 31 38

## ЗМІСТ

**Технічна політика**

Світові тенденції розвитку мікроелектроніки та місце Республіки Білорусь у цьому процесі. *Білоус А. І., Пилипенко В. О., Турцевич А. С., Шведов С. В.* (3)

**Нові компоненти для електронної апаратури**

Електричні з'єднувачі для поверхневого непаяного монтажу. *Єфіменко А. А.* (9)

**Електронні засоби: дослідження, розробки**

Формалізовані показники для оцінки якості радіотехнічних систем охорони периметрів об'єктів. *Колісник К. В., Кіпенський А. В., Мачехін Ю. П., Чурюмов Г. І.* (16)

**Системи передачі та обробки сигналів**

Синхронізація потоків даних у багатоканальних системах цифрової обробки сигналів з перестроюваною структурою. *Шейк-Сейкін А. М.* (20)

**Матеріали електроніки**

Широкозонні халькогенідні сцинтилятори на основі сполук  $A^{II}B^{VI}$ . *Старжинський М. Г., Гриньов Б. В., Рижиков В. Д., Малюкін Ю. В., Жуков А. В., Сідлецький О. Ц., Зеня І. М., Лалаянц А. І.* (25)

Прогноз діелектричних втрат у склокерамиці для різних співвідношень масових часток компонентів. *Дмитрієв М. В., Єримічой І. М., Панов Л. І.* (29)

**Функціональна мікро- та наноелектроніка**

Дослідження температурної залежності контактного опору омичних контактів до InP. *Новицький С. В.* (32)

Індуктивність, що електрично перестроюється напівпровідниковою структурою. *Семенов А. А., Усанов Д. О., Колокін О. А.* (35)

Схемотехніка НВІС для мікроелектронного координатно-чутливого детектора для елементного аналізу матеріалів. *Сидоренко В. П., Вербицький В. Г., Прокоф'єв Ю. В.* (39)

**Сенсоелектроніка**

Ефективність збору зарядів в датчиках  $\gamma$ -випромінювання з різною конфігурацією електродів. *Кондрік О. І.* (47)

## CONTENTS

**Technical policy**

Global trends in microelectronics and place of Belarus in this process. *Belous A. I., Pilipenko V. A., Turtsevich A. S., Shvedov S. V.* (3)

**New components for the electronic equipment**

Electrical connectors for surface solderless mounting. *Yefimenko A. A.* (9)

**Electronic facilities: investigations, development**

Formal indicators to assess the quality of radio systems perimeter security facilities. *Kolesnik K. V., Kipenskiy A. V., Machehkhin Yu. P., Churyumov G. I.* (16)

**Systems of signals transfer and processing**

Synchronization of data flows in multichannel systems of digital signals processing with configurable structure. *Sheik-Seikin A. N.* (20)

**Materials of electronics**

Wide-band chalcogenide scintillators on the basis of  $A^{II}B^{VI}$  compounds. *Starzhinskiy N. G., Grinyov B. V., Ryzhikov V. D., Maliykin Yu. V., Zhukov A. V., Sidletskiy O. Ts., Zenya I. M., Lalayants A. I.* (25)

Dielectric loss prediction in glass-ceramics for different correlation of mass shares of components. *Dmitriev M. V., Yerimichoy I. N., Panov L. I.* (29)

**Functional micro- and nanoelectronics**

Effect of annealing temperature on the value of contact resistance of ohmic contacts to InP. *Novitskiy S. V.* (32)

Inductance, electrically adjusted by semiconductor structure. *Semenov A. A., Usanov D. A., Kolokin A. A.* (35)

Circuit design of VLSI for microelectronic coordinate-sensitive detector for material element analysis. *Sidorenko V. P., Verbitskiy V. G., Prokofiev Yu. V.* (39)

**Sensoelectronics**

Charges collection efficiency in gamma-ray detectors with different electrodes configuration. *Kondrik O. I.* (47)

УДК 621.3.049.77(001.18)

Д. т. н. А. И. БЕЛОУС, чл.-корр. НАН Беларуси, д. т. н. В. А. ПИЛИПЕНКО,  
д. т. н. А. С. ТУРЦЕВИЧ, С. В. ШВЕДОВ

Республика Беларусь, г. Минск, ОАО «ИНТЕГРАЛ»  
E-mail: office@bms.by

## МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И МЕСТО РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ В ЭТОМ ПРОЦЕССЕ

*В обзоре приведен анализ развития микроэлектроники в экономически развитых странах за период 7–10 лет до 2008 года, когда в мировой экономике начало проявляться влияние экономического кризиса. В статье использованы данные Stat World Fab Watch. Также рассмотрены достижения и потенциальные возможности ОАО «ИНТЕГРАЛ» — головной организации, отвечающей за микроэлектронную отрасль в Белоруссии.*

**Ключевые слова:** микроэлектроника, элементно-компонентная база, наукоемкая продукция, тенденции развития, мировой рынок.

Современное развитие индустриальных стран базируется на все более широком использовании изделий электронной техники во всех сферах жизнедеятельности — промышленности, транспорте, связи, телекоммуникациях, здравоохранении, банковской и социальной областях, военной технике и т. д. Ни одна отрасль хозяйства, ни одно предприятие не могут работать продуктивно, если не оснащены современной высокотехнологичной электронной аппаратурой и электронной системой управления.

С середины XX века электронная промышленность — ключевая составляющая электронной отрасли, обеспечивающей благосостояние любого государства, безусловный лидер в мировом разделении труда, объемы ее производства неуклонно возрастают, определяя прогресс во всех других сферах жизни. Это самая быстро развивающаяся отрасль, которая производит больше добавочной стоимости, чем любая другая промышленная отрасль.

Главное место в электронной промышленности занимает микроэлектроника, развитие которой базируется на достижениях микроэлектронной элементно-компонентной базы и определяет уровень развития радиоэлектронной отрасли промышленности в целом.

Микроэлектронная элементно-компонентная база — это широкая номенклатура изделий и приборов, определяющая технические и потребительские характеристики конечной продукции, выпускаемой во всех отраслях промышленности (машиностроение, транспорт, энергетика, медицинское приборостроение и др.).

Статья подготовлена на основании доклада на конференции «Современные информационные и электронные технологии» (Украина, г. Одесса, 4–8 июня 2012 г.)

Опыт ведущих стран мира показывает, что реализация технических и социально-экономических программ развития микроэлектроники приводит к интегральному эффекту, далеко выходящему за рамки микроэлектронной отрасли, в том числе к росту рынка наукоемкой продукции, повышению технического уровня и конкурентоспособности в смежных отраслях — связи и телекоммуникаций, вычислительной техники, ракетно-космической, авиационной, машиностроительной, автотранспортной, станкостроительной и других.

Объем производства продукции мировой радиоэлектронной отрасли промышленности почти в 4,5 раза превосходит объем производства нефти, бензина и минерального сырья, почти в 3 раза — производство химических продуктов и пластиков, в 2,5 — объемы грузоперевозок и более чем в 2 раза — производство электричества и газа.

Следует отметить, что в развитых странах именно наукоемкий продукт является главным источником пополнения бюджета. Если продажа одной тонны сырой нефти может принести до 20 USD прибыли, то всего лишь один килограмм промышленной продукции в сложной радиоэлектронной бытовой технике дает прибыль до 50 USD, в авиации до 500–600, а в электронике до 3000 USD (1 кг кристаллов современных СБИС в 2,4 раза дороже 1 кг золота).

Экономическую эффективность электроники в развитых странах наглядно демонстрируют следующие факты:

- 1 USD вложений приносит до 100 USD в конечном продукте;
- среднемировой срок окупаемости вложений составляет два-три года;

- темпы роста отрасли в три раза выше темпов роста внутреннего валового продукта;
- одно рабочее место в электронной промышленности позволяет создать до четырех рабочих мест в других отраслях;
- 1 кг изделий микроэлектроники по стоимости соответствует 110 т нефти.

Но одной лишь экономической эффективностью дело не ограничивается. Информационные технологии и микроэлектроника, получив широчайшее развитие в передовых странах мира, привели к глубоким изменениям их социальной структуры, еще больше увеличив отрыв этих стран от остального человечества. Пример тому — удельное производство электронной техники, показанное на **рис. 1**.

Показателен тот факт, что доля стоимости изделий электронной техники в стоимости современных промышленных, бытовых и военных

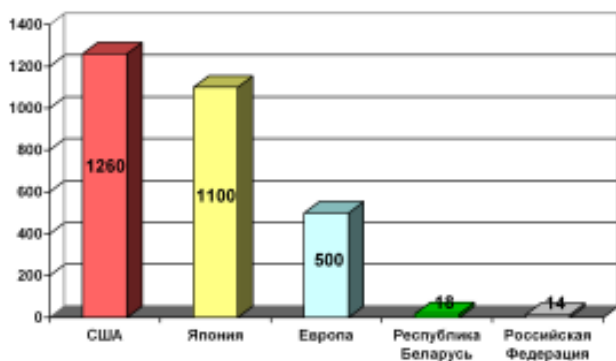


Рис. 1. Удельное производство электронной техники (в расчете на душу населения)

радиоэлектронных приборов и систем составляет от 30 до 80% и ежегодно возрастает. Объем продаж электронных изделий на мировом рынке имеет абсолютное лидерство (больше автомобилестроения, металлургии, нефтехимии и т. д.). Электронная отрасль является безусловным лидером в мировом разделении труда, объемы ее производства неуклонно растут, определяя прогресс во всех других сферах, таких как аэрокосмическая и радиоэлектронная промышленность, роботостроение, приборостроение, производство вычислительной и оптоволоконной техники, офисного оборудования, разработка программного обеспечения. Сама же электроника базируется на развитии и достижениях микроэлектронной отрасли. Поэтому ведущие страны мира уделяют приоритетное внимание развитию микроэлектроники как «точки роста» экономики и национальной безопасности. Опыт этих стран показывает, что реализация технических и социально-экономических целей и задач развития микроэлектроники приводит к появлению интегрального эффекта, выходящего далеко за рамки микроэлектронной отрасли, в том числе к росту рынка наукоемкой продукции, повышению технического уровня и конкурентоспособности в смежных отраслях — радиоэлектронной,

связи и телекоммуникаций, вычислительной техники, автотранспортной, станкостроительной и др.

Основной тенденцией развития микроэлектроники является непрерывный рост интеграции многих функций в составе одного микроэлектронного изделия — совмещение функций приема, хранения, обработки и передачи данных. Это позволяет создать новую элементную базу для радиоэлектронных систем, обеспечивая резкое снижение затрат на ее производство и эксплуатацию, повышение надежности и расширение функциональных возможностей. Наиболее ярко это видно на примерах телевидения (однокристальный телевизор) и связи (мобильные телефоны с выходом в Internet).

Отметим важную особенность в развитии микроэлектроники — экстенсивный рост производства во время роста продаж и технологический рост (разработка и внедрение новых технологий и перспективных изделий) при сужении рынка. При этом обострение конкуренции вызывает ускоренный переход к меньшим проектным нормам и переход к «глубокому субмикрону». Так, переход, например, от 1,0 к 0,35 мкм обеспечивает снижение себестоимости БИС в 8–9 раз за счет уменьшения площади кристалла при одновременном росте рентабельности в 3–4 раза за счет повышения функциональной сложности интегральных схем.

Однако переход на новые проектные нормы требует огромных финансовых затрат на капитальное строительство, оборудование, новые технологии. На **рис. 2** в качестве типового примера представлена информация, характеризующая уровень финансовых затрат на создание производств изделий с проектными нормами менее 0,1 мкм. Так, например, стоимость создания завода (фабрики) с одним базовым техпроцессом производства пластин Ø300 мм в зависимости от его мощности для проектных норм 90...65 нм составляет от 2,5 до 3,0 млрд USD; для 45...32 нм — от 3,5 до 4,0 млрд USD; для 22...12 нм — от 4,5 до 6,0 млрд USD. И это только стоимость строительства и оборудования без учета стоимости разработки (или покупки лицензии) технологического процесса.

Стоимость разработки базового КМОП-процесса изготовления БИС с проектными нормами 90 нм в AMD составляла 310 млн USD и 400 млн USD для 65 нм. Стоимость разработки 45 и 32 нм-технологий оценивается, соответственно, в 600 и 900 млн USD, а разработка 22 нм-процесса — более 1,3 млрд USD. Количество фирм, которые могут позволить себе такие затраты, очень мало, так, технология с проектными нормами 22 нм освоена только четырьмя фирмами.

На **рис. 3** представлена динамика распределения мирового производства пластин за период 1999–2007 гг. для различных проектных норм. По вертикальной оси представлены объемы еженедельного запуска (тысяч пластин) в пересчете

Transition to new semiconductor technologies are becoming technologically and financially challenging

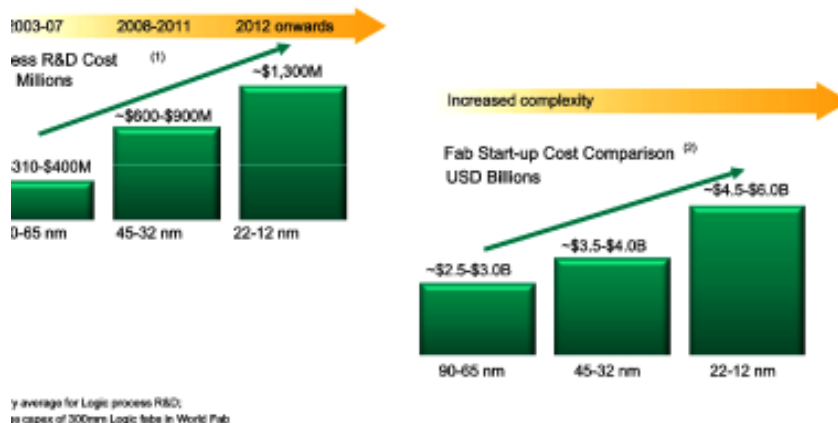


Рис. 2. Уровень финансовых затрат на создание производств с проектными нормами менее 0,1 мкм (источник: In-Stat 1/07, World Fab Watch; analyst reports)

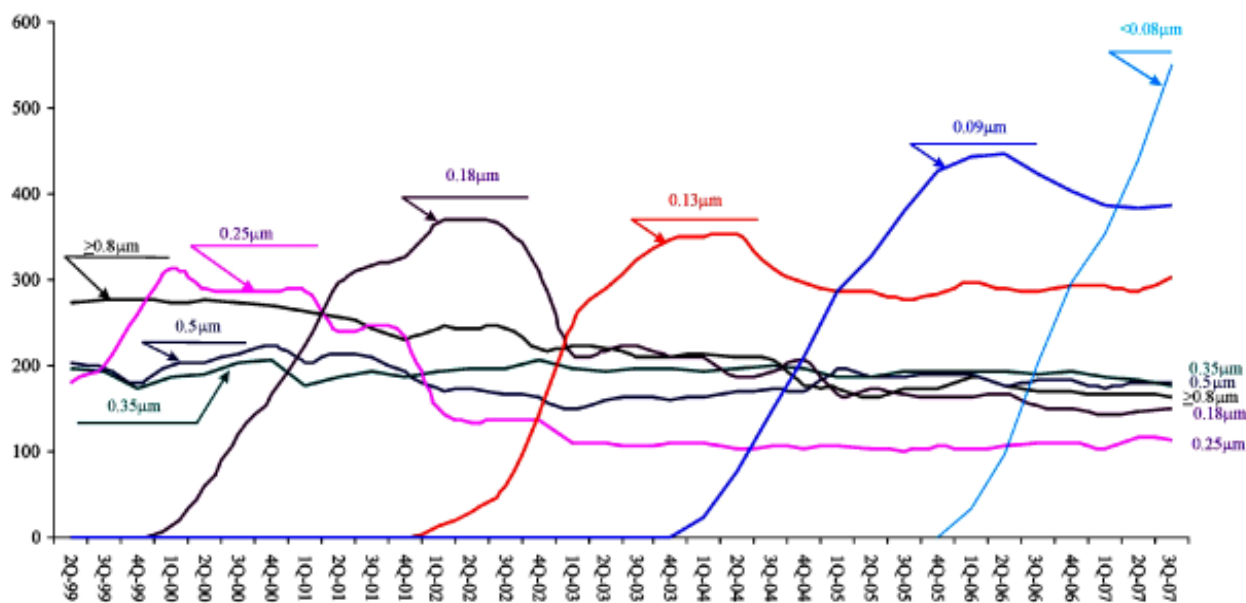


Рис. 3. Динамика распределения мирового производства пластин для различных проектных норм (источник: SICAS/Future Horizons)

на эквивалентные 200 мм-пластины, а по горизонтальной оси — квартал и год выпуска.

Отвлекаясь от количественных характеристик, т. е. от объемов производства, следует отметить главное — каждые два года на рынок выходит следующее поколение микросхем. Так, в I квартале 2000 г. пик производства приходился на изделия с 0,25 мкм-нормами, и в это время на рынке появляются 0,18 мкм-изделия, производство которых достигает пика во II квартале 2002 г. В III квартале 2002 г. начинается спад производства 0,18 мкм-БИС, потому что на рынок выходят 0,13 мкм-изделия, которые достигают пика производства через два года и т. д.

Вместе с этим следует отметить важный факт — хотя объемы запуска изделий со «старыми» проектными нормами существенно упали, они все же остались на рынке. Наблюдается парадоксальная, на первый взгляд, картина — на начало «кризисного» 2008 г. в мире еженедельно запускалось в два раза больше пластин с 0,8 мкм-нормами, чем с 0,25 мкм, и больше, чем 0,35 и 0,18 мкм. При этом в течение семи предшествующих лет (2001 — 2007 гг.) объемы запуска пластин с этими нормами не уменьшались, следовательно — они востребованы на рынке.

Обратим внимание на то, что наиболее стабильна ниша изделий с проектными нормами 0,35 мкм и выше, причем объем производства



таких изделий составляет около 20% объема рынка. Этот факт еще раз подтверждает вывод о том, что данный сегмент полупроводниковой отрасли может быть использован для разработки таких изделий и продвижения их на мировой рынок.

Поскольку для создания микроэлектронных изделий кроме технологии и оборудования необходимо иметь дорогостоящие программные и аппаратные средства проектирования, становится очевидной причина стремительного развития фаблисс-модели бизнеса в микроэлектронике.

Сегодня фаблисс-модель является наиболее динамично развивающейся и наиболее эффективной в полупроводниковом бизнесе, поскольку размер требуемых инвестиций на организацию стандартного дизайн-центра и приобретение для него средств САПР и библиотек проектирования на несколько порядков ниже стоимости любой современной производственной линейки. Не случайно рост продаж, продемонстрированный фаблисс-компаниями, последние годы значительно выше среднеотраслевого. Так, объем продаж десятки лучших фаблисс-фирм (дизайн-центров) за 2007 год составил 28,015 млрд USD, что всего лишь в 4 раза меньше объема продаж десятки лучших фирм, имеющих собственные производственные линии.

Головной организацией, отвечающей за развитие микроэлектронной отрасли в Беларуси, является ОАО «ИНТЕГРАЛ» [1]. По общепринятой мировой классификации предприятие относится к классу IDM, т. е. к компаниям, которые производят микроэлектронные компоненты только собственной разработки. На ОАО «ИНТЕГРАЛ» реализуется весь комплекс работ, включающий проектирование и производство широкой номенклатуры микроэлектронных изделий и законченных товаров (медицинские приборы, электронные табло, блоки управления бытовой, промышленной, автомобильной и сельскохозяйственной техникой и др.). Таких крупных фирм в мире насчитывается всего несколько десятков, и к их числу относятся Intel, Motorola, Siemens, Texas Instruments (TI), NEC, Toshiba.

В отличие от большинства зарубежных компаний, ОАО «ИНТЕГРАЛ» обладает широким спектром технологических процессов: базовый КМОП, КМОП со встроенным блоком EEPROM, КМОП со встроенными высоковольтными (100 В и выше) блоками, специальный радиационно стойкий КМОП-процесс, различные варианты биполярных процессов, включая радиационно стойкие, комбинированные биполярно-полевые (БиКМОП); КНИ-технология для спецприменений, MOSFET — процессы для изготовления мощных быстродействующих и высоковольтных транзисторов и другие.

За всю историю своего существования предприятие не купило ни одной лицензии, что, безусловно, говорит о высоком уровне квалификации персонала — как разработчиков, так и линейных производственных технологов.

Постоянное обновление номенклатуры выпускаемой микроэлектронной продукции (более 2 тыс. типов интегральных микросхем, 500 типов полупроводниковых приборов, 200 типов жидкокристаллических индикаторов, около 150 типов изделий электронной техники) позволяет ОАО «ИНТЕГРАЛ» в условиях жесткой конкуренции сохранять завоеванные на мировом рынке ниши и в значительной степени удовлетворять потребности структурообразующих предприятий отечественной радиоэлектронной отрасли в микроэлектронных компонентах.

В таблице приведены данные для сопоставления количества типов изделий и объемов выпуска интегральных микросхем и полупроводниковых приборов в России и ОАО «ИНТЕГРАЛ» за 2007 год.

| Количество типов и объемы производства изделий электронной техники | Россия | ОАО «ИНТЕГРАЛ» |
|--|--------|----------------|
| Количество типов ИМС   | 1500   | 2000           |
| Количество типов полупроводниковых приборов                        | 2000   | 500            |
| Объем производства микросхем, млрд шт.                             | 1,7    | 1,2            |
| Объем производства дискретных полупроводниковых приборов, млрд шт. | 2,2    | 2,1            |

Большую часть в номенклатуре микроэлектронной продукции ОАО «ИНТЕГРАЛ» занимает микроэлектронная элементарно-компонентная база (ЭКБ) специального и двойного назначения (категории качества «ВП» и «ОСМ»). В настоящее время производится свыше 250 типов интегральных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов специального назначения, половина из которых создана за последние пять лет. Эта продукция пользуется спросом на внешнем рынке (преимущественно в Российской Федерации) благодаря высокому качеству и надежности. Министерством обороны РФ ОАО «ИНТЕГРАЛ» сертифицирован на разработку и серийный выпуск изделий для предприятий Военно-промышленного комплекса (ВПК) РФ.

Главные преимущества ЭКБ ОАО «ИНТЕГРАЛ», безоговорочно признанные потребителями ВПК России и их конкурентами, — это новые конструктивно-технологические решения и топологии ИМС, запатентованные в РФ, обеспечивающие высокую надежность и работоспособность устройств в условиях воздействия повышенной радиации, облучения нейтронами, гамма-излучения, рентгеновского излучения, электромагнитного импульса [2]. Такие техни-



ческие характеристики и параметры исключительно важны для систем вооружения, электронных систем управления военной и космической техникой, систем управления и обеспечения безопасности АЭС. На постсоветском пространстве ОАО «ИНТЕГРАЛ» — единственный реально признанный поставщик таких изделий для атомной энергетики, ряда предприятий «Роскосмоса».

В космическом пространстве полупроводниковые устройства должны функционировать при наличии жесткой радиации, обусловленной облучением ионами, присутствующими в космических лучах и солнечном ветре, а также захваченными в радиационных поясах вокруг Земли. ОАО «ИНТЕГРАЛ» в течение ряда лет участвует в работах для «ближнего» и «дальнего» космоса, в частности — в новом направлении по созданию производства уникальных интегральных микросборок приборов с зарядовой связью для космических аппаратов дистанционного зондирования земли, не имеющих мировых аналогов (аппарата «БелКА» и миниспутника «БКЛ» (Беларусь); спутника «Канопус» (Россия); космического аппарата «БКВР» с видеоаппаратурой высокого разрешения, систем картографии и метеорологических наблюдений («Летающий электронный глаз») (Россия).

С использованием микроэлектронной продукции ОАО «ИНТЕГРАЛ» в России создаются новейшие образцы систем стратегических вооружений — «Тополь-М», «Булава», «Синева», зенитно-ракетный комплексы С-400, 500, истребители пятого поколения Су-35, МиГ-35, вертолеты МИ-28, «Акула», «Аллигатор» (КА-50, 52), подводные лодки четвертого поколения типа «Юрий Долгорукий» проекта 955 «Борей» и др.

Созданная на ОАО «ИНТЕГРАЛ» электронная компонентная база используется в научных проектах разных стран, что прекрасно демонстрирует возможности белорусской науки и микроэлектронной промышленности. Ряд интегральных схем, спроектированных и изготовленных в ОАО «Интеграл», прошел успешную апробацию и безотказно работает в проектах GEM (суперколлайдер SSC, США), DO (коллайдер Тэватрон Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми, США), CMS (Большой адронный коллайдер LHC, Центр Европейского совета ядерных исследований), PiBeta (Швейцария), PANDA (ускорительный комплекс FAIR, Германия), в многочастичном спектрометре и универсальном калориметрическом детекторе в Дубне, в программе СВД-2 на спектрометре с вершинным детектором и установке ОКА на ускорителе У-70 (Россия). Успех такой деятельности обусловлен меньшей по сравнению с зарубежными стоимостью разработок, их высокой надежностью, стабильными техническими параметрами, приемлемой ценой, хорошо организованным коммерческим сотрудничеством.

Эффективная концентрация усилий ученых НАН Беларуси, ВУЗов, отраслевых НИИ и КБ

и серийных заводов позволила в значительной степени решить задачу насыщения рынка Республики Беларусь и стран СНГ конкурентоспособной элементной базой для приоритетных отраслей народного хозяйства и национальной обороны, обеспечила повышение экспортного потенциала РБ, развитие новых энерго- и ресурсосберегающих импортозамещающих наукоемких технологий и изделий.

В настоящее время в области электроники и ее применений в Республике Беларусь проводятся исследования и разработки по различным программам. В рамках программы «Союзный телевизор» уже разработан и внедрен в серийное производство целый спектр сложнотелевизионных микросхем и полупроводниковых приборов для приемников цветного изображения, которые используются как отечественными («Горизонт», «Витязь»), так и российскими производителями телевизоров.

В рамках подпрограммы «База» ОАО «ИНТЕГРАЛ» разрабатывает более 70 типов новых микросхем, предназначенных в первую очередь для систем вооружения и военной техники, а также для изделий народнохозяйственного назначения.

В рамках программы «Суперкомпьютер» ОАО «ИНТЕГРАЛ» разработана и уже поставлена Заказчику СБИС потокового гиперпроцессора «Мини-Тера», где на кристалле размером 10,6×11,0 мм размещено более миллиона транзисторов с 0,5 мкм проектными нормами. Использование оригинальной архитектуры СБИС в 10-выводном корпусе с напряжением питания 3 В позволило обеспечить производительность суперкомпьютера до 1,2 гигафлопс на первом образце и до 20 гигафлопс в дальнейшем.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» вместе со специалистами-материаловедами РБ развивает наступательную деятельность на рынке полупроводников, которая обозначена весьма широко: изделия военного назначения, комплекты схем для автомобильной электроники, телевизионной техники, средства связи и телекоммуникаций, приборы и средства управления ними в виде конвертеров, интеллектуальных ключей и т. п.

Уже созданы сверхбольшие интегральные схемы на пластинах диаметром 200 мм с проектными нормами 0,35 мкм в рамках инвестиционного проекта «Организация субмикронного производства на ОАО «ИНТЕГРАЛ». Этот проект позволит решить многие проблемы совместного радиоэлектронного комплекса Белоруссии и России, в том числе по изготовлению микросхем с информационной емкостью 1—4 Мбит, устойчивых к внешним воздействиям. В дальнейшем предполагается разработать высоковольтные элементы, микросхемы RF-диапазона, кристаллы с возможностью радиоприема FM-диапазона, новые конкурентоспособные изделия: радиационно стойкие микросхемы специального назначения для систем вооружений и военной техники, сверхбольшие интегральные схемы цифровой

обработки сигналов, микросхемы для средств связи и телекоммуникаций и т. д. Изделия двойного назначения найдут свое применение в создании систем вооружения и военной техники, в том числе и в России. Существующий в Беларуси достаточно мощный комплекс тракторо- и автомобилестроения предполагает повышенное внимание к электронике, стоимость которой составляет до 30% стоимости авто. При этом применяются комплекты схем, основанные на новых стандартах бортовой аппаратуры.

Перспективной является разработка мощных приборов и средств управления ими — так называемых интеллектуальных ключей, схем управления импульсными источниками питания. Планируется выпуск новых поколений DC/DC- и AC/DC-преобразователей, имеющих громадный спрос на рынке. Первые используются в каждом сотовом телефоне, вторые — в каждом зарядном устройстве для него. Освоение этого направления обеспечит потребности внутреннего рынка и позволит завоевать часть зарубежного, в том числе и российского, несмотря на присутствие западных гигантов в этом секторе.

Из проведенного анализа и перспектив развития микроэлектроники следует, что Республике Беларусь необходимо использовать свой большой научный и практический опыт для разработки новых технологий, которые используются на ведущих микроэлектронных фирмах мира. К таким технологиям относятся:

— технология изготовления структур кремний-на-изоляторе (КНИ), включая разработку системы проектирования ИС на КНИ-подложках и разработку техпроцессов изготовления КМОП-ИС на КНИ-пластинах. Это позволит создавать радиационно-, тепло- и помехоустойчивые ИС, высокотемпературные ИС (до 350°C), ИС силовой электроники, а также откроет принципиальные возможности разработки схем с трехмерной интеграцией;

— технология формирования Si/Ge-структур для изделий высокоскоростной электроники, включая разработку систем проектирования ИС на Si/Ge-структурах и разработку техпроцессов изготовления приборов с высоким быстродействием. Для разработки такой технологии необходимо проведение предварительных исследований особенностей роста субтонких (50 нм на 10 слоев) наноразмерных пленок и нанокластеров сплава  $Si_xGe_y$  на полупроводниковых и диэлектрических подложках. На основе этих исследований будут разработаны процессы создания СВЧ-транзисторов нового поколения, светодиодов и элементов энергонезависимой памяти;

— технология изготовления систем энергонезависимой памяти на транзисторах с плавающим затвором с германиевыми квантовыми точками в туннельном диэлектрике и на основе сегнетоэлектриков (FRAM-технология);

— технологии изготовления радиационно стойких ИС (биполярная, КМОП, Би-КМОП), включая систему их проектирования.

Основными потребителями электронной элементной базы производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» являются практически все крупные структурообразующие предприятия радиоэлектронных комплексов Беларуси, России и других стран СНГ, а также стран Юго-Восточной Азии, Европы и Северной Америки. Только использование современной элементной базы позволит решить задачу обеспечения конкурентоспособности их продукции на мировом рынке. Именно поэтому задача развития отечественной микроэлектроники является приоритетной для нашего государства и заслуживает особого внимания.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Турцевич А.С., Гуминский В.В., Перет А.Ф. Нарращивание, заимствование, преемственность — постулаты инновационного развития ОАО «ИНТЕГРАЛ» // Наука и инновации. — №3. — 2012. — С. 9—12. [Turtsevich A.S., Guminskii V.V., Perets A.F. // Nauka i innovatsii. N 3. 2012. P. 9]

2. Богатырев Ю.В., Шведов С.В. Радиационно стойкие интегральные схемы // Наука и инновации. — №3. — 2012. — С. 13—14. [Bogatyrev Yu.V., Shvedov S.V. // Nauka i innovatsii. N 3. 2012. P. 13]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 05.06 2012 г.*

Belous A. I., Pilipenko V. A., Turtsevich A. S., Shvedov S. V. **Global trends in microelectronics and place of Belarus in this process.**

*Keywords: microelectronics, element-component base, high-tech products, trends, world market.*

The review summarizes development of microelectronics in the developed countries over the period of 7—10 years until 2008, when the economic crisis started to effect the global economy. The data from Stat World Fab Watch has been used in the paper. Achievements and potential of "Integral" PC — the parent organization responsible for the microelectronic industry in Belarus — are also reviewed.

Republic of Belarus, Minsk, "INTEGRAL" PC.

Білоус А. І., Пилипенко В. О., Турцевич А. С., Шведов С. В. **Світові тенденції розвитку мікроелектроніки та місце Республіки Білорусь у цьому процесі.**

*Ключові слова: мікроелектроніка, наукоємна продукція, тенденції розвитку, світовий ринок.*

Наведено аналіз розвитку мікроелектроніки в економічно розвинутих країнах за період 7—10 років до 2008 р. (використано дані Stat World Fab Watch). Розглянуто досягнення та потенційні можливості ВАТ «Інтеграл» — головної організації у мікроелектронній галузі Білорусі.

Республіка Білорусь, м. Мінськ, ВАТ «ІНТЕГРАЛ».

UDC 621.37:621.311

*Ph. D. (Techn.) A. A. YEFIMENKO*

Ukraine, Odessa state politechnic university

E-mail: aiefimen@gmail.com

## ELECTRICAL CONNECTORS FOR SURFACE SOLDERLESS MOUNTING

*The article describes the features of development, possibilities of manufacture and application of electrical connectors for surface mounting with flexible printed cables and elastomer liners. With regard to characteristics, manufacturability and, especially, mounting technological effectiveness, they can rival connectors with digital metal contacts.*

*Keywords: electrical connectors, solderless mounting, surface mounting, design of electronic equipment, contact joints, flexible printed cables, elastomeric liners.*

No electrotechnical or radio engineering device can operate without connectors. There is a very large variety of designs of electrical connectors for the electronic devices, which meet almost any customers request. Very often the connectors ensure manufacturability issues of improving performance of manufacturing and installation of products.

The article focuses on such properties of connectors — the possibility of surface mounting with the implementation of solderless contact connections. Efficient designs oriented on batch fabrication of contacts and connectors assembly are introduced. Combining consumer needs and manufacturability suggests the prospect of use of such connectors for multi-contact electronic components.

Modern connectors can contain several hundred contacts, arranged with a relatively small interval of about 1 mm, and naturally, the simultaneous installation of such a large number of contacts into the holes and soldering of the contacts may cause some difficulties.

Importance of ensuring of manufacturability of connectors assembly caused the appearance of certain methods. The use of contact joints made by press-fit (press-in) technology [1–3] improves the performance only partially — there are no solder joints, but mounting into plated-through holes remains. Moreover, the size of contact connections makes the possibilities of their miniaturization very limited.

An original solution is the design of electrical connectors for surface solderless mounting proposed by the author earlier. The contact connection in such electrical connectors is ensured by mutual pressing of contact surfaces [3–5]. This design significantly improves manufacturability of the mounting and quality of the contact connection due to large contact area. In this case, the design

of connectors simplifies owing to the use of the batch method of forming of contacts on a flexible printed cable (**FPC**). Pending this work the task was set to develop various types of electrical connectors designed for application in a variety of electronic devices with the use of FPC and elastomeric spring liners for solderless surface mounting, as well as to determine characteristics of such connectors experimentally. This article describes the results of these studies.

### DESIGN OF ELECTRICAL CONNECTORS

The developed connectors are included to the group of low-frequency rectangular direct joint connectors, so in fact they consist of one part — a socket, while the terminal contacts of PCB of electronic modules or other similar structures serve as a plug.

The basis of the connector is made of contact groups manufactured according to the technology of flexible printed cables, and elastomeric liners, which function as group springs for contact elements.

**Fig. 1** shows an electrical connector which is designed with the use of above-listed elements [6].

The plug is located in the rear part of the PCB 1 of electronic module and includes printed circuit contacts (lamellae) 2 and the slot 3, which serves for the precise junction with the socket. The socket consists of a body 4 with a working cavity 7 and a bridge 6, a cap 9, made of plastic, an elastomeric liner 13 and an FPC 5 with printed contacts 8. For fixing of the socket on the printed-circuit back-board there are latches 14 and fixing pin 10 with a hole 11 in its rear part for fixing the socket, for example, with a cotter pin. There also are pins 12, which are used for accurate fixage of the sockets on the PCB.

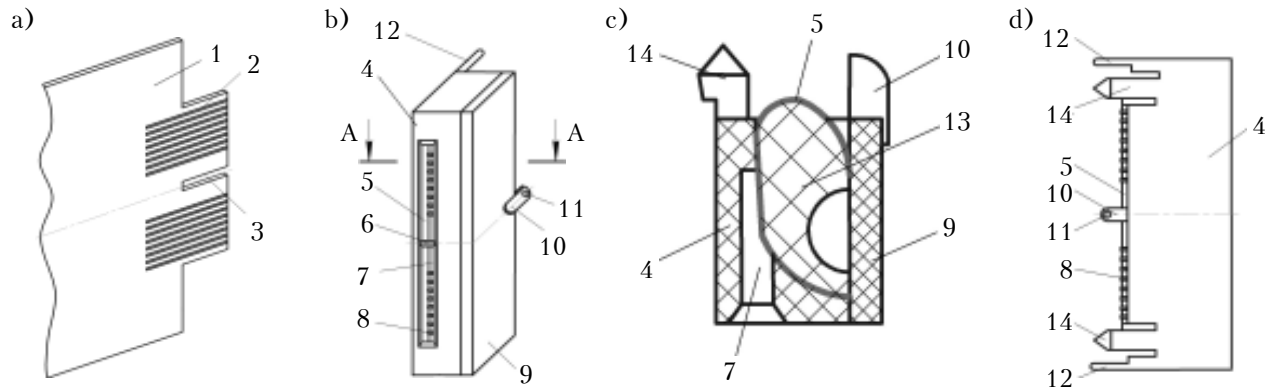


Fig. 1. Structural components of the electrical connector based on FPC and elastomeric liner (*a* – plug on the PCB; *b*, *c*, *d* – general view of the socket, its sectional view taken along A–A plane and its left-side view): 1 – PCB of the electronic module; 2 – printed contacts; 3 – guide groove; 4 – body; 5 – FPC; 6 – rail bridge; 7 – working cavity; 8 – printed contacts of socket; 9 – cap; 10 – fixing pin; 11 – fixing hole; 12 – drive pins; 13 – liner; 14 – catch

FPC is inserted into the socket body. FPC contacts project from the body in two planes: in one they contact with the PCB of the electronic module and in the other – with the printed-circuit backboard, as it is shown in **fig. 2**.

The junction is formed as follows. The plug of the PCB of the electronic module is inserted into the working cavity of the socket, and the rail bridge of the socket body enters the guide groove of the PCB, thereby providing an exact match of contacts. As the working cavity narrows, the distance between the FPC and the left wall of the body at a certain depth of the cavity becomes less than the thickness of PCB of electronic module, which ensures a reliable contact junction. At the same time the elastic liner acts as a group spring, creating a constant pressing force for contacts. Thus a gas-tight contact connection with a large effective contact area is formed.

The electrical connection between the socket FPC and the backboard with the use of the above-mentioned elastic liner is formed similarly in a different plane.

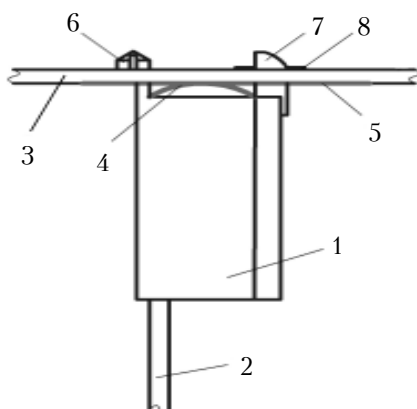


Fig. 2. Mechanical and electrical contact connection: 1 – socket; 2 – PCB of the electronic module; 3 – printed-circuit backboard; 4, 5 – printed contacts on the socket's FPC and on the printed-circuit backboard respectively; 6 – catch; 7 – pin; 8 – cotter pin

### TECHNOLOGY FEATURES OF ELECTRICAL CONNECTORS BASED ON FPC AND ELASTOMERIC LINERS

Parts of connectors are produced with the use of standard technologies, characteristic for manufacture of electronic equipment, namely, PCB manufacture, injection molding of thermoplastic plastic, molding of silicone rubber. In order to ensure low transitional contact resistance the appropriate metal coatings must be applied on the contact areas. It should be remembered that there are two places of contact in the socket (zones A and B in **fig. 3**): a plug connection with the PCB of electronic module and a virtually permanent connection with the backboard. The choice of coating is determined by the use conditions.

In this case it is possible to perform a very simple in terms of manufacturing local coating of FPC contacts. This enables rational use of precious metals.

A particular attention should be paid to the method of producing socket contacts. It is similar to the technology of producing single- or double-sided flexible PCB, which usually applies high-efficiency equipment. This allows to obtain any number of contacts by batch method for an entire connector simultaneously.

On the other hand, the manufacturing of the FPC is possible with the use of dimensional electrochemical processing, which allows to receive a double-composite structure, since there is no adhesive to glue the foil to the insulating film substrate [7]. Such FPC has unique operational performance, which are determined by characteristics of polyimide instead of adhesive, which is present in all known structures of FPC.

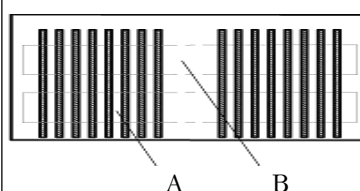


Fig. 3. Design of FPC with contact groups and local coating zones A and B



Assembly operations for sockets manufacturing are performed by simple methods without any fitting.

Mounting of sockets on the backboard runs without soldering — by clamping contact surfaces. Mechanical fastening under certain conditions can be carried out with the use of such an effective method as latching and locking with a cotter pin (see fig. 2).

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF THE CONNECTORS

The connectors were studied both as a whole, with respect to all the structure, and by the most important constituent elements which determine quality performance and manufacturability of the connectors.

#### Choice of material for elastomeric liner

Elastomeric liner being a part of the socket serves as a group spring, which provides the necessary pressure at the contact joints, thereby providing the required transient contact resistance. In this terms, a very important feature of the liner is the working temperature range in which the elasticity and hardness should be varied insignificantly. The residual deformation in this case should not considerably progress over time.

The analysis of characteristics for different materials has revealed that mixtures based on siloxane rubbers are the most appropriate for the liners. Such materials are good electrical insulators and ensure functionality of the liner in the temperature range from  $-60$  to  $250^{\circ}\text{C}$  and at humidity up to 98%.

The analysis of the range of above-mentioned compounds has shown that ИПИ-1265, ИПИ-1338 siloxane mixtures and a composition consisting of ИПИ-1265 and ИПИ-1266 mixtures most fully meet the requirements.

To determine relative residual deformation of components made of these mixtures accelerated tests were carried out for two types of samples in the air in compressed state at  $100$ ,  $150$  and  $200^{\circ}\text{C}$ :

- standard samples (cylinders of 10 mm both in diameter and length);
- samples, the form and size of which match with socket liners.

On the basis of the test results the guarantee term for liners has been calculated, which made 17,5 years for the selected rubber compounds.

Test results for the samples of second type are shown in fig. 4.

Here, the relative residual deformation of compression was given by

$$C = \frac{h_0 - h}{h_0 - h_s} \cdot 100\%,$$

where  $h_0$ ,  $h$  — thickness (width) of liners before and after testing, respectively;

$h_s$  — thickness (width) of a device used for the test which provided compression of the liners.

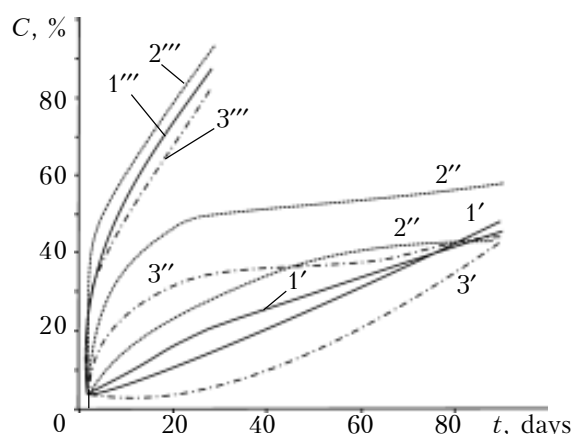


Fig. 4. Time dependence of relative residual deformation of liners made of different compressed materials at different temperatures:

1 — ИПИ-1265, 2 — ИПИ-1338; 3 — silicon composition;  $\langle' \rangle$  —  $100^{\circ}\text{C}$ ;  $\langle'' \rangle$  —  $150^{\circ}\text{C}$ ;  $\langle''' \rangle$  —  $200^{\circ}\text{C}$

Analysis of the obtained data considering the technological properties of all tested compounds showed that the best material for the liner is the silicone composition based on mixtures of ИПИ-1265 and ИПИ-1266.

#### Calculation of the contact resistance of connectors

An important quality index of the connectors is the transitional contact resistance. It is not only its nominal value that is important, but also its possible changes during the operational process and the tests. The most convenient way to control the transitional contact resistance is by means of measurement. It is impossible, however, to measure the transitional contact resistance  $R_k$  directly. This can be done as follows. Having used a part of the contacts for the measurements — let us call them the output contacts — we shall obtain resistance  $R_m$ , which comprises the output contacts resistance  $R_k$  and the transitional resistance  $R_p$ .

With a certain approximation  $R_k$  can be regarded as a constant during the operational process and the tests. Therefore, having measured or calculated  $R_k$ , we can determine transitional contact resistance by the formula

$$R_p = R_m - R_k. \quad (1)$$

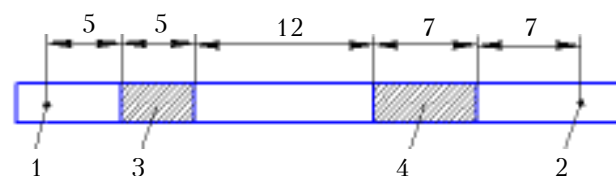
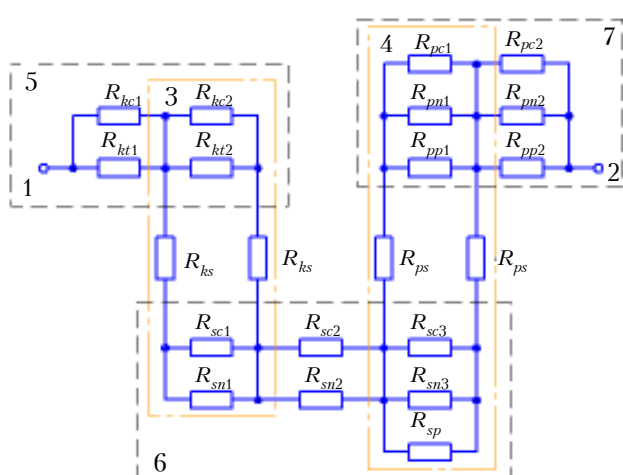


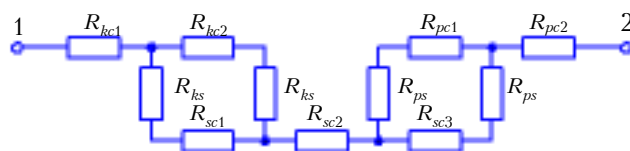
Fig. 5. Geometric model of the contact connection between the backboard, the socket FPC and the electronic module PCB:

1, 2 — resistance measurement points on the backboard and the electronic module PCB, respectively; 3, 4 — areas of contact between the socket FPC and the backboard and between the socket FPC and the electronic module PCB, respectively

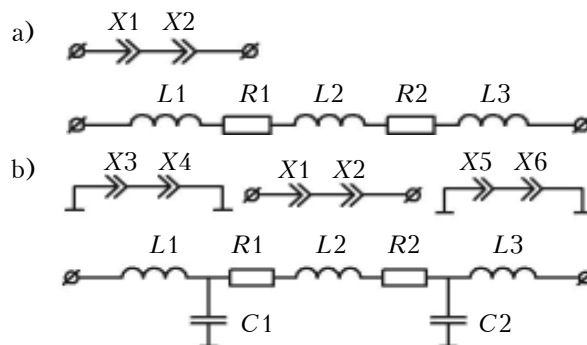


**Fig. 6.** Electrical circuit of contact connection of the socket FPC (6), the backboard (5) and the electronic module PCB (7)

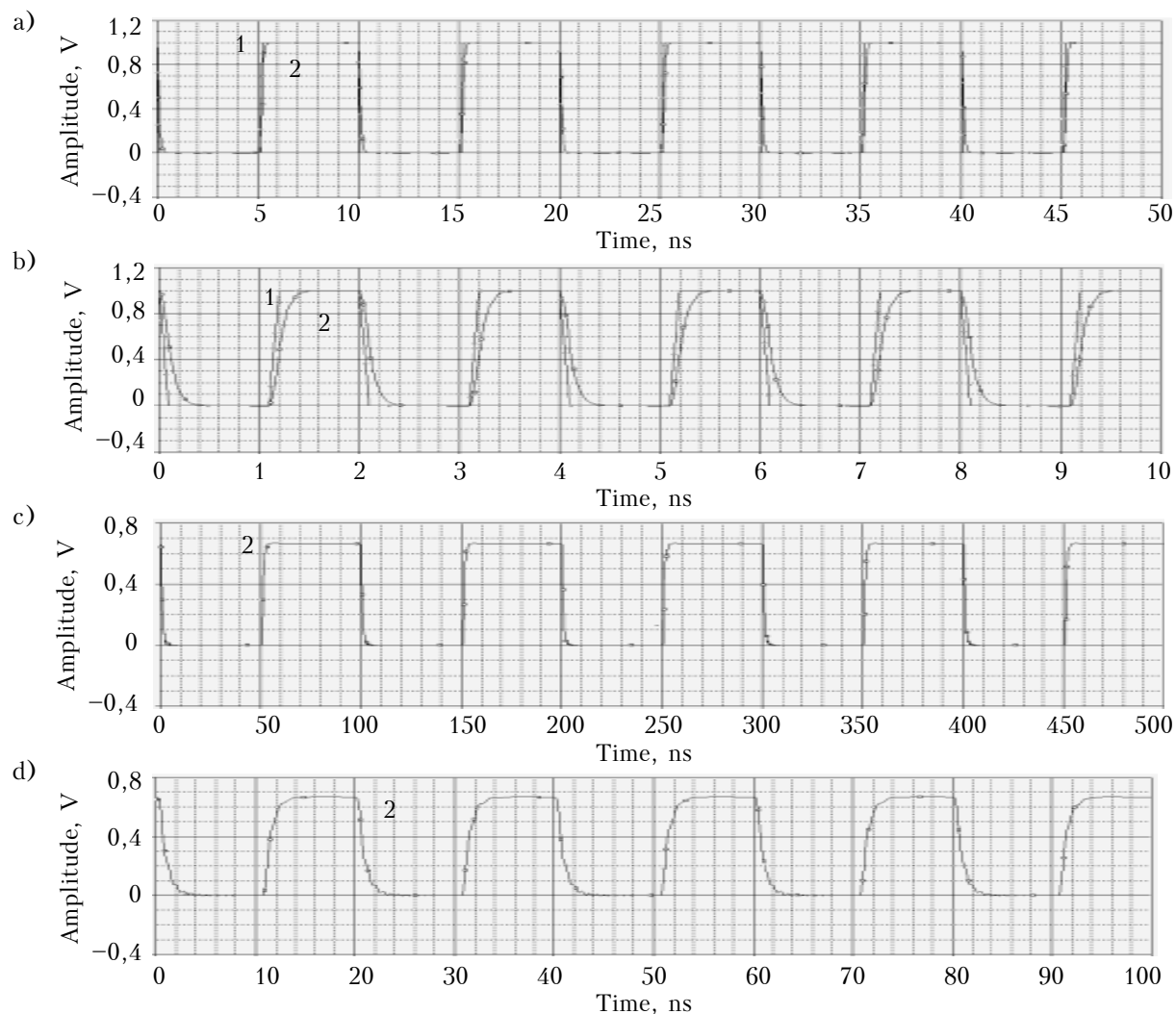
(1, 2, 3, 4 – same as in fig. 5)



**Fig. 7.** Simplified electrical circuit of the contact connection



**Fig. 8.** Connection circuits and their equivalent circuits without earthed terminals (a) and with contiguous earthed contacts (b)



**Fig. 9.** Passage of pulse signal through the contacts connected as shown in fig. 8, a (100 MHz (a) and 500 MHz (b)), and according to fig. 8, b (10 MHz (c) and 50 MHz (d)):

1 – input signal; 2 – output signal

In order to calculate the contact resistance  $R_k$  let us consider a geometrical model of the contact connection from fig. 2 given in fig. 5 and its equivalent electrical circuit in fig. 6.

The figure contains the following designations:  $R_{kc1}$ ,  $R_{kc2}$ ,  $R_{kt1}$ ,  $R_{kt2}$  — resistance of base metal (copper) and the coating (e. g., tin alloy), respectively, in contact zones (CZ) of the backboard;  $R_{pc1}$ ,  $R_{pc2}$ ,  $R_{pn1}$ ,  $R_{pn2}$ ,  $R_{pp1}$ ,  $R_{pp2}$  — resistance of copper, nickel sublayer and coating layer (e. g., palladium), respectively, in CZ on electronic module PCB;  $R_{sc1}$ ,  $R_{sc2}$ ,  $R_{sc3}$ ,  $R_{sn1}$ ,  $R_{sn2}$ ,  $R_{sn3}$ ,  $R_{sp}$  — resistance of copper, nickel sublayer and coating layer (e. g., palladium), respectively, in CZ on FPC;  $R_{ks}$ ,  $R_{ps}$  — transitional resistance of contacts “backboard — FPC” and “FPC — electronic module PCB”, respectively.

Given that the layers and sublayers of coatings forming CZ have small thickness and high resistivity compared to the base metal (copper foil), these contact resistance components may be neglected. As a result, the equivalent electrical circuit acquires the form shown in fig. 7. This diagram can be used for practical calculations of the contact resistance of the connection in question.

#### Modeling of connectors as a current line

As large number of plug connections in modern electronics are supposed to transmit high-frequency signals, it is advisable to do researches on low-frequency connectors (to which the investigated connectors are referred) in terms of their possible use for the transmission of high-frequency signals (more than 3 MHz). To this effect, there has been performed a modeling of transmission of a pulse signals of different frequency through the contact connections in question. For this purpose two connection circuits and their equivalent electrical circuits, presented in fig. 8 ( $X1...X6$  — contact connections;  $R1$ ,  $R2$  — contact resistance, including transitional contact resistances ( $R1=R2=0,019\Omega$ );  $L1...L3$  — contact inductance  $L1=L2=L3=24\text{ nH}$ ;  $C1$ ,  $C2$  — capacity relative to adjacent contacts ( $C1=C2=1,1\text{ pF}$ )), have been used [8].

The effect of contact connections as irregularities in the current lines on the transmission are simulated with P-Spice program. The simulation results are given in fig. 9.

Analysis of the output signals given in fig. 9, *a* and *b*, and their comparison with the input ones allows to speak about their negligible distortion even at ultra-high frequency (500 MHz). The results given in fig. 9, *c* and *d*, show that the signal contacts being surrounded by the earthed contacts allows to improve their noise immunity to crosstalk signals.

However a dramatic distortion of the signal is noticeable at relatively lower frequencies.

#### ISSUES OF SYSTEM USE OF FPC-BASED CONNECTORS

The connector shown in fig. 1 and 2 serves as a switching device between the electronic modules of the first level by means of the backboard. However, the capabilities of the FPC-based connector

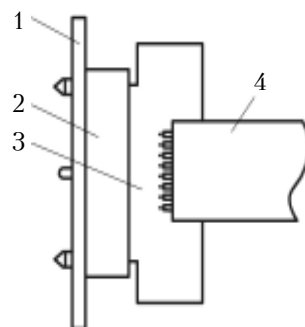


Fig. 10. Design of the electrical contacts for external connections and connections between second level modules: 1 — backboard; 2 — socket; 3 — plug; 4 — ribbon cable or FPC

come to more than this. Let us consider constructive decisions for different types of connectors.

Design of the connector that plugs into the backboard from the outer side for external connections and the connections between second level modules is shown in fig. 10.

This version of the socket in the main has the same constructive solution as the one described above, i. e. it is mounted on the surface of the backboard by clamping (no soldering), saving it is mounted from the outer side. Socket 2 is connected with other modules or with external circuits by means of plug 3, based on a rigid PCB, on which a ribbon wire (cable), a round cable, a harness, an FPC can be mounted.

A possibility for two-way connection of first level electronic modules to the backboard with sockets is shown in fig. 11. Such design of electrical connections with the possibility of using two-way access to electronic equipment allows to create flexible layout diagrams and to efficiently use the volume of electronic devices for arrangement of PCB-based electronic modules.

A connecting device which is mounted on the surface of the PCB by clamping is shown in fig. 12. Operating principle and design of the

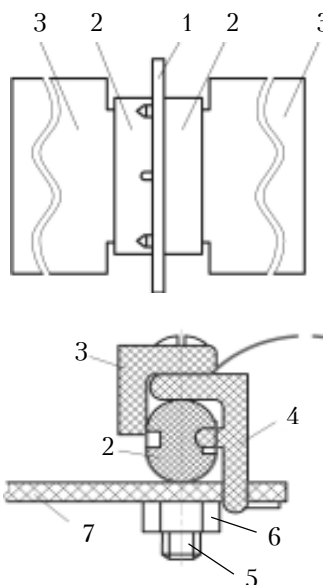


Fig. 11. Two-way connection of first level electronic modules to the backboard: 1 — backboard; 2 — socket; 3 — electronic module PCB

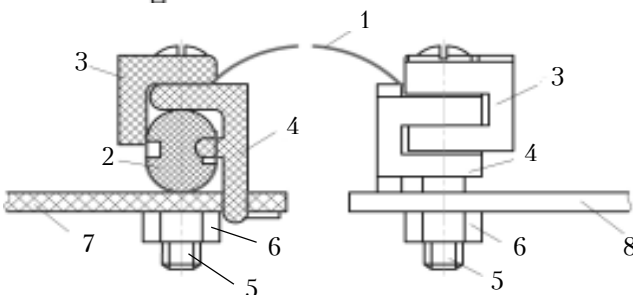


Fig. 12. Electrical connection by clamping of two PCB: 1 — FPC; 2 — elastomeric liner; 3, 4 — insulators cases; 5 — screw; 6 — nut; 7 — PCB1; 8 — PCB2

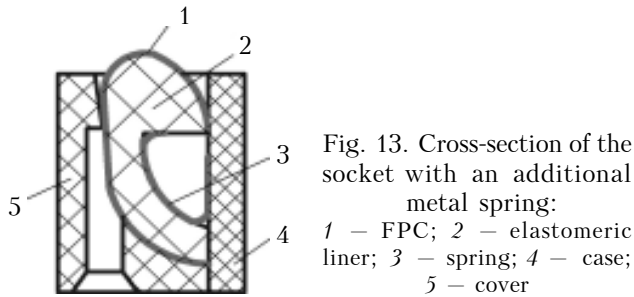


Fig. 13. Cross-section of the socket with an additional metal spring:  
1 – FPC; 2 – elastomeric liner; 3 – spring; 4 – case; 5 – cover

device are described in [5]. Connections can be made both within a single PCB and to connect two PCB located relative to each other in any planes. The figure shows the connection of two circuit boards 7 and 8 by means of such a device. For a better perception of the image units of one PCB are shown in cross-section.

Here we shall present a few other constructive solutions for FPC-based connectors with improved quality performance and greater capability.

Previously in the study the issue of selecting an elastomeric liner material was dealt with. One of the key external factors affecting the quality is operation temperature increase, which makes the residual deformation accumulate in the liners. This results in significant weakening of the pressure between the contacts, and, therefore, in increase of transitional contact resistance.

For embodiments of connectors for application at high temperatures, a constructive version of the socket may be offered, in which, except for elastomeric liner, a metallic spring is used for reliability improvement [9].

A cross section of a modified socket, similar to that shown in fig. 1 is shown in **fig. 13**. If during the operation of the connector the residual deformation is accumulated in the liner, the metal spring compensates its waning effect.

It is possible to significantly improve the performance of the connectors by duplicating the number of contacts with a certain increase in thickness of the socket. This option opens when two FPC and two elastomeric liners are used in one socket – bilateral arrangement of contacts, including the terminal contacts (lamellae) on the electronic module PCB (**fig. 14**).

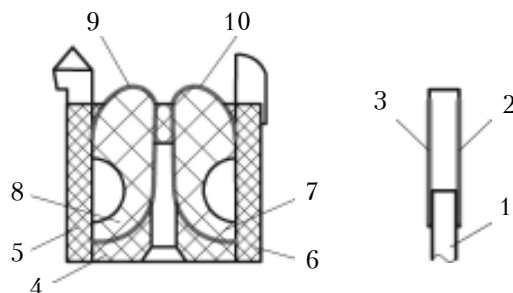


Fig. 14. The construction of connector with bilateral contacts layout:  
1 – plug; 2, 3 – terminal printed contacts (lamellae); 4 – socket body; 5, 6 – covers; 7, 8 – elastomeric liners; 9, 10 – FPC

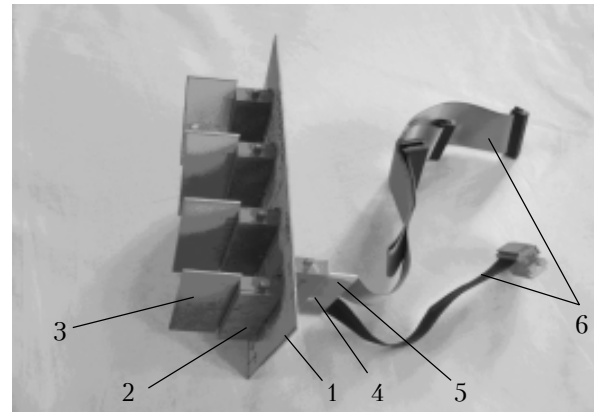


Fig. 15. Experimental model that implements the inter-unit electrical connections:

1 – backboard; 2 – socket for electronic module PCB connection; 3 – fragment of electronic module PCB; 4 – socket for external connections; 5 – plug; 6 – ribbon cables with connectors

Product design and engineering of FPC-based connectors and elastomeric liners are realized to a certain extent in the samples shown in **fig. 15**. Here the backboard 1 with sockets 2 provides electrical connections between first level electronic modules, which are presented by fragments of PCB 3. In its turn, the connection of the backboards as components of second level electronic modules, as well as their external connection is performed by socket 4, plug 5 and, for instance, wire cable connections 6. Besides, the socket 4 is mounted on the surface of PCB1 similarly to socket 2.

| Contact arrangement pitch, mm | Number of contacts | Maximum intensity of contact current, A | The maximum voltage, V |      | Contact resistance, mΩ, max |
|-------------------------------|--------------------|---|------------------------|------|-----------------------------|
|                               |                    |   | working                | test |                             |
| 5                             | 13                 | 4                                       | 400                    | 1600 | 10                          |
| 2,5                           | 26                 | 2                                       | 250                    | 1200 | 20                          |
| 1,25                          | 52                 | 1,2                                     | 150                    | 800  | 40                          |

In this sample were used sockets and the plugs with a contacts arrangement pitch (which defines the dimension type of connector) of 1,25, 2,5 and 5 mm and with the surfaces of working parts coated with palladium. According to test results, the main parameters of the connectors are within the range of values given in the **table**. At these current values the connectors superheat temperature does not exceed 20°C.

\*\*\*

The proposed designs are oriented on batch fabrication of contacts and connectors assembly. The research results has shown the feasibility of manufacturing and application of electrical connectors based on the FPC and elastomeric liners,



which, due to their technical characteristics, manufacturability and, especially, mounting technological effectiveness, can rival connectors with digital metal contacts.

## REFERENCES

1. AMP. Product Guide. Printed Circuit Board Connectors acc. DIN 41612.
2. HARTING. Product Guide. Connectors DIN 41612.
3. Ефименко А. А., Собченко Д. Л. Непаяные контактные соединения в электронных печатных узлах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 3. — С. 3—9. [Efimenko A. A., Sobchenko D. L. // Tekhnologiya i konstruirovanie v elektronnoi apparature. 2009. N 3. P. 3]
4. Патент 1265 України. З'єднувач для друкованих плат / А. А. Єфименко. — 1993. — Бюл. № 3. [Patent 1265 Ukraini. / A. A. Efimenko. 1993. Bull. 3]
5. Патент 1266 України. Пристрій для з'єднання друкованих плат / А. А. Єфименко. — 1993. — Бюл. № 3. [Patent 1266 Ukraini. / A. A. Efimenko. 1993. Bull. 3]
6. Патент 9797 України. Роз'єм для печатних плат / А. А. Єфименко. — 1996. — Бюл. № 3. [Patent 9797 Ukraini. / A. A. Efimenko. 1996. Bull. 3]
7. ТУ3594-097-0750430-2002. Гибкие печатные кабели марки ГПК-МП. [TU3594-097-0750430-2002. Gибkie pechatnye kabeli marki GPK-MP]
8. Ефименко А. А., Шаталов В. В. Моделирование разъемных контактов в электрических соединениях электронной аппаратуры // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2001. — № 4—5. — С. 7—110. [Efimenko A. A., Shatalov V. V. // Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature. 2001. N 4—5 P. 7]
9. Патент 2006112 Российской Федерации. Разъем для печатных плат / А. А. Ефименко, О. И. Шкодин. — 1994. — Бюл. № 1. [Patent 2006112 Rossiiskoi Federatsii. / A. A. Efimenko., O. I. Shkodin. 1994. Bull. 1]

Received 12.06 2012

Ефименко А. А. Электрические соединители для поверхностного непаяного монтажа.

*Ключевые слова: электрические соединители, непаяный монтаж, поверхностный монтаж, проектирование электронных устройств, контактные соединения, гибкие печатные кабели, эластомерные вкладыши.*

В статье рассмотрены особенности создания, возможность изготовления и применения электрических соединителей для поверхностного монтажа на основе гибких печатных кабелей и эластомерных вкладышей. По своим техническим характеристикам, а также технологичности изготовления и, особенно, монтажа, они способны составить конкуренцию соединителям с дискретными металлическими контактами.

Украина, Одесский национальный политехнический университет.

Єфименко А. А. Електричні з'єднувачі для поверхневого непаяного монтажу.

*Ключові слова: електричні з'єднувачі, непаяний монтаж, поверхневий монтаж, проектування електронних пристроїв, контактні з'єднання, гнучкі друковані кабелі, еластомерні вкладиші.*

У статті розглянуто особливості створення, можливість виготовлення та застосування електричних з'єднувачів для поверхневого монтажу на основі гнучких друкованих кабелів та еластомерних вкладишів. За своїми технічними характеристиками, а також технологічністю виготовлення та, особливо, монтажу, вони здатні скласти конкуренцію з'єднувачам з дискретними металевими контактами.

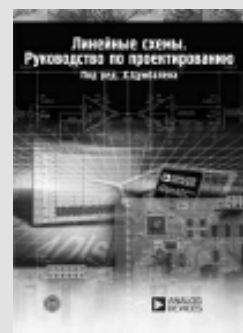
Україна, Одеський національний політехнічний університет.

## НОВЫЕ КНИГИ

## НОВЫЕ КНИГИ

**Линейные схемы. Руководство по проектированию / Под ред. Х. Цумбалена. — Москва: Техносфера, 2011. — 1128 с.**

Сделан исчерпывающий анализ важных аналоговых компонентов и вопросов их практического применения при проектировании линейных схем. Более тысячи рисунков облегчают восприятие материала. Книга содержит подробное описание компонентов аналоговых схем для практикующих разработчиков, проверенные практическим внедрением примеры проектов основных типов линейных схем, советы по чтению технических описаний и выбору коммерческих операционных усилителей, в ней рассмотрены вопросы проектирования печатных плат. Издание будет полезно в качестве учебного материала или справочного пособия для инженеров, занимающихся разработкой аналоговых и аналого-цифровых устройств.



УДК 654.9

К. т. н. К. В. КОЛЕСНИК<sup>1</sup>, д. т. н. А. В. КИПЕНСКИЙ<sup>1</sup>,  
д. т. н. Ю. П. МАЧЕХИН<sup>2</sup>, д. т. н. Г. И. ЧУРЮМОВ<sup>2</sup>

Украина, <sup>1</sup>НТУ «Харьковский политехнический институт»,

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники

E-mail: kolesniknet@ukr.net

## ФОРМАЛИЗОВАННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОХРАНЫ ПЕРИМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ

*Предложен метод, основанный на использовании формальных параметров, который существенно упрощает процедуру создания эффективных радиотехнических систем для охраны периметров территориально распределенных объектов на этапе проектирования.*

*Ключевые слова:* радиотехнические системы, охрана объектов, электронные приборы, обеспечение качества.

Создание эффективных радиотехнических систем охраны периметров территориально-распределенных объектов является в настоящее время достаточно актуальной и важной задачей [1, 2]. Актуальность этой задачи обусловлена не только повышенными требованиями к тактико-техническим характеристикам данных систем, но и технико-экономическими аспектами, поскольку их создание требует значительных капиталовложений.

В настоящее время к территориально-распределенным объектам контроля принято относить некоторые участки земной поверхности, имеющие на своей территории здания и сооружения, объединенные общим периметром значительной протяженности. Очевидно, что условия применения радиотехнических систем охраны периметров таких объектов на отдельных его участках могут отличаться друг от друга по различным причинам (назовем их факторами условий применения — **ФУП**), от которых зависит распространение радиоволн, а значит, и эксплуатационные характеристики средств контроля (**СК**). К ФУП могут быть отнесены факторы естественного, природного характера, такие как нелинейность земной поверхности, наличие водных и скальных участков, растительный покров, биологические объекты (птицы и животные), климатические условия и др. К факторам искусственного происхождения относят здания и сооружения в зоне охранного периметра, физические ограждения, источники электромагнитных излучений и т. д. [1, 3].

Проведенные исследования показали, что влияние этих факторов на эффективность СК пространственных объектов и радиотехнических систем охраны периметров в целом носит сложный нелинейный многокритериальный характер [4, 5]. Поэтому использование в качестве критериев оценки качества системы прямых

физических зависимостей характеристик СК от условий применения делает эту задачу достаточно сложной.

На практике зачастую применяются экспертные (эвристические) методы оценки, когда на основании данных об условиях эксплуатации и характеристик средств контроля эксперт определяет для каждого участка охранного периметра те средства, которые, по его мнению, могут быть использованы с наибольшей эффективностью. Безусловно, при этом определенную роль играет субъективный фактор, что в ряде случаев может привести к снижению качества систем охраны. Используемые в радиотехнических системах охраны периметров (**РТСОП**) датчики имеют различные принципы преобразования первичной информации, что усложняет сравнительную оценку их качества в зависимости от условий применения. Поэтому создание научно-обоснованных методов оценки качества РТСОП и методик, упрощающих этот процесс, является важной научно-прикладной задачей. В настоящей работе для этого предлагается использовать упрощенную методику [5, 6], основанную на применении формализованных показателей качества для оценки способности СК выполнять свои функции в различных условиях применения. Принцип проведения такой формализации следующий.

В результате анализа периметр охраняемого объекта разбивается на определенные участки, которые характеризуются рядом ФУП (**рис. 1**). Каждый  $i$ -й ФУП имеет свою характеристику  $P_i$ . Диапазон ее изменения от минимального значения ( $P_i^{\min}$ ) до максимального ( $P_i^{\max}$ ) разбивается на  $m$  поддиапазонов  $\Delta P_i^k$ , величина каждого из которых задается исходя из целесообразной дискретизации всего диапазона изменения  $P_i$ . Формализованный показатель качества  $M_i$  принимает значения 1, 2, ...,  $m$  в пределах соответствующих поддиапазонов (**рис. 2**).

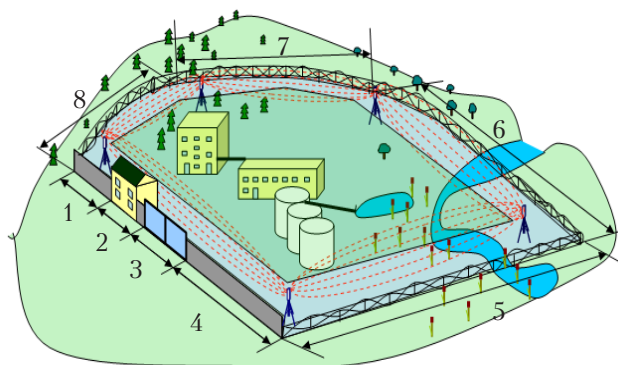


Рис. 1. Схема территориально-распределенного объекта

Приведем пример формализации показателей качества СК для РТСОП территориально-распределенного объекта, схема которого приведена на рис. 1.

К факторам условий применения, влияющим на качество используемых средств контроля, отнесем такие характеристики периметра объекта контроля, как:

- длина контролируемой зоны;
- рельеф местности;
- архитектурно-строительные особенности;
- климатические условия;
- наземный покров.

Отметим, что данный список может быть изменен в зависимости от конкретных требований.

Обозначим формализованные показатели качества СК, соответствующие перечисленным характеристикам, как  $K_d$ ,  $K_p$ ,  $K_{ac}$ ,  $K_{кл}$ ,  $K_{мп}$ . Результаты определения их значений приведены в табл. 1—5. Значения показателя  $K_d$  ставились в зависимости от длины  $L$  контролируемой зоны. Значения  $K_p$  определялись в соответствии с коэффициентом нелинейности земной поверхности  $k_{нел}$ , который учитывает особенности распространения радиоволн. Для определения значений показателя  $K_{ac}$  использовались усредненные значения коэффициента отражения радиоволн архитектурно-строительными формами  $k_{отр}$ , расположенными на периметре объекта контроля. Для определения  $K_{кл}$  необходимо учитывать температуру и влажность воздуха. Значения  $K_{мп}$  ставились в зависимости от характера земной поверхности, наличия растительности и ее высоты.

Далее относительно выбранных условий формализации была систематизирована имеющаяся в распоряжении база данных средств контроля пространственных объектов [3, 4]. При этом для каждого из рассматриваемых СК с учетом табл. 1—5 были определены значения формализованных показателей качества. Они приведены в табл. 6 для нескольких конкретных СК.

Рассмотрим характеристики ФУП периметра объекта, приведенного на рис. 1. Весь периметр разделим на участки — это будет восемь конт-

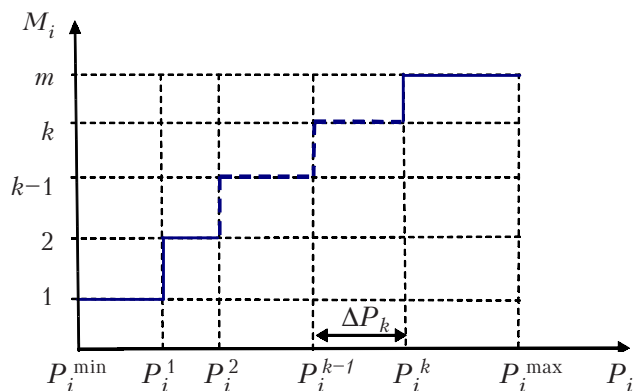


Рис. 2. Зависимость формализованного показателя качества от значения характеристики ФУП

рольных зон, в пределах каждой из которых условия применения можно считать постоянными. Их характеристики приведены в табл. 7. На основании этих данных и данных табл. 1—5 можно определить значения формализованных показателей качества средств контроля для каждой из зон. Они приведены в табл. 8.

По данным табл. 6 и 8 сформируем матрицы значений формализованных показателей качества средств контроля ( $R$ ) и показателей, определяемых условиями применения ( $B$ ):

$$R = \begin{Bmatrix} 2 & 4 & 7 & 2 & 3 \\ 3 & 4 & 7 & 2 & 3 \\ 2 & 2 & 6 & 2 & 3 \\ 4 & 2 & 5 & 3 & 2 \\ 5 & 6 & 7 & 2 & 6 \end{Bmatrix}; \quad B = \begin{Bmatrix} 3 & 1 & 6 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 7 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 3 & 2 & 2 \\ 3 & 1 & 6 & 2 & 3 \\ 4 & 2 & 4 & 2 & 3 \\ 4 & 2 & 4 & 2 & 4 \\ 4 & 3 & 4 & 2 & 4 \\ 4 & 2 & 4 & 2 & 4 \\ 4 & 1 & 4 & 2 & 3 \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Имея две такие численно-определенные матрицы, можно выполнить оценку качества радиотехнических систем охраны периметров территориально распределенных объектов еще на стадии проектирования. Для этого может быть использовано условие достаточности

$$R \geq B. \quad (2)$$

Для наглядности на рис. 3 в виде столбчатых диаграмм показаны значения формализованных показателей качества, определяемых условиями применения в зоне №5 объекта рис. 1 (см. табл. 8), и тех, которые могут быть обеспечены средствами контроля (см. табл. 6). Как видно из рисунка, условию (2) для зоны №5 удовлетворяет только одно СК — «Газон-2». Средства контроля СП4У, FMW 3/2 и ИД-40 не удовлетворяют условию (2) по значению  $K_d$ , а ЕМЦ 2/200 — по значению  $K_{мп}$ .

**Таблица 1**

Формализованный показатель качества в зависимости от длины контролируемой зоны

| L, м           | <10 | 10–30 | 30–100 | 100–200 | >200 |
|----------------|-----|-------|--------|---------|------|
| K <sub>д</sub> | 1   | 2     | 3      | 4       | 5    |

**Таблица 2**

Формализованный показатель качества в зависимости от рельефа местности

| k <sub>нел</sub> | <0,05 | <0,10 | <0,20 | <0,30 | <0,50 | >0,50 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K <sub>р</sub>   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |

**Таблица 3**

Формализованный показатель качества в зависимости от архитектурно-строительных форм

| Архитектурно-строительные формы | k <sub>отр</sub> | K <sub>ас</sub> |
|---------------------------------|------------------|-----------------|
| Малые формы                     | <0,10            | 1               |
| Калитка                         | 0,10–0,15        | 2               |
| Проездные ворота                | 0,10–0,30        | 3               |
| Ограждение из колючей проволоки | 0,20–0,40        | 4               |
| Легкое ограждение               | 0,30–0,40        | 5               |
| Капитальное ограждение          | 0,40–0,60        | 6               |
| Одноэтажное строение            | 0,45–0,60        | 7               |
| Строение более одного этажа     | >0,60            | 8               |

**Таблица 5**

Формализованный показатель качества в зависимости от наземного покрова

| Характеристика покрова           | Высота растительности, см | K <sub>пп</sub> |
|----------------------------------|---------------------------|-----------------|
| Водная поверхность               | 0                         | 1               |
| Растительность отсутствует       | <10                       | 2               |
| Травянистый покров               | <30                       | 3               |
| Кустарник и заболоченные участки | <70                       | 4               |
| Редколесье                       | <150                      | 5               |
| Лесопарковые зоны                | >150                      | 6               |

**Таблица 4**

Формализованный показатель качества в зависимости от климатических условий

| Климатические условия | Температура, °С, | Влажность, % | K <sub>кл</sub> |
|-----------------------|------------------|--------------|-----------------|
| Умеренные             | –10...+50        | 80           | 1               |
| Нормальные            | –40...+50        | 98           | 2               |
| Сложные               | –50...+50        | 98           | 3               |
| Особенные             | –50...+ 65       | 98           | 4               |

**Таблица 6**

Значения формализованных показателей качества средств контроля

| Тип СК   | K <sub>д</sub> | K <sub>р</sub> | K <sub>ас</sub> | K <sub>кл</sub> | K <sub>рп</sub> |
|----------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| СП4У-40  | 2              | 4              | 7               | 2               | 3               |
| FMW 3/2  | 3              | 4              | 7               | 2               | 3               |
| ИД-40    | 2              | 2              | 6               | 3               | 3               |
| ЕМЦ2/200 | 4              | 2              | 5               | 3               | 2               |
| Газон -2 | 5              | 6              | 7               | 2               | 6               |

**Таблица 7**

Характеристики ФУП контрольных зон периметра объекта (климатические условия – нормальные)

| № зоны | Длина зоны, м | Рельеф ( $k_{\text{нел}}$ ) | Архитектурно-строительные особенности | Покров                          |
|--------|---------------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| 1      | 50            | <0,05                       | Ж/б* ограда                           | Трава                           |
| 2      | 10            |                             | КПП**                                 | Асфальт                         |
| 3      | 10            |                             | Ворота                                |                                 |
| 4      | 50            | <0,10                       | Ж/б ограда                            | Заболоченность                  |
| 5      | 120           |                             | <0,20                                 | Ограждение из колючей проволоки |
| 6      | 196           |                             |                                       |                                 |
| 7      | 170           |                             |                                       |                                 |
| 8      | 100           | <0,10                       |                                       | Трава                           |

**Таблица 8**

Значения формализованных показателей качества средств контроля для каждой из контрольных зон периметра объекта

| № зоны | K <sub>д</sub> | K <sub>р</sub> | K <sub>ас</sub> | K <sub>кл</sub> | K <sub>рп</sub> |
|--------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1      | 3              | 1              | 6               | 2               | 3               |
| 2      | 2              | 1              | 7               | 2               | 2               |
| 3      | 2              | 1              | 3               | 2               | 2               |
| 4      | 3              | 1              | 6               | 2               | 4               |
| 5      | 4              | 2              | 4               | 2               | 4               |
| 6      | 4              | 3              | 4               | 2               | 5               |
| 7      | 4              | 3              | 4               | 2               | 5               |
| 8      | 4              | 2              | 4               | 2               | 3               |

\* Железобетонная; \*\* контрольно-пропускной пункт



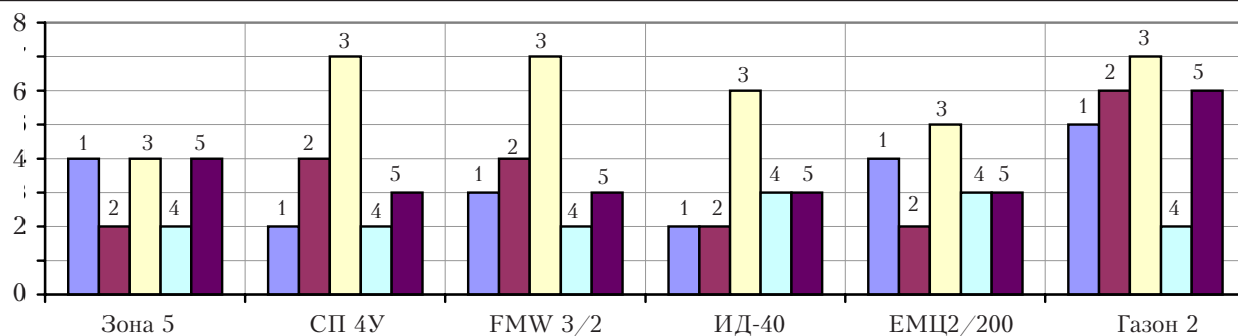


Рис. 3. Диаграмма формализованных показателей качества, определенных для зоны №5 контроля объекта и обеспечиваемых различными СК:

1 —  $K_d$ ; 2 —  $K_p$ ; 3 —  $K_{ac}$ ; 4 —  $K_{kl}$ ; 5 —  $K_n$

В заключение отметим, что данный метод пригоден для создания эффективных радиотехнических систем охраны периметров территориально-распределенных объектов для практики любых условий применения. Он позволяет осуществлять дискретный выбор средств контроля не путем многокритериального анализа параметров условий применения и характеристик средств контроля, а путем математического анализа двух матриц — состояния периметра объектов контроля и характеристик средств контроля.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Магауенов Р.Г. Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2008. [Magauenov R.G. Sistemy okhrannoi signalizatsii: osnovy teorii i printsipy postroeniya. Moscow: Goryachaya liniya Telekom, 2008]

2. Колесник К.В., Поляков Г.Е., Чурюмов Г.И. Анализ принципов построения и оценка современного технического уровня радиотехнических систем охраны периметров объектов // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Силовая электроника та енергоефективність». — 2009. — Ч. 2. — С. 104 — 108. [Kolesnik K.V., Polyakov G.E., Churyumov G.I. // Tekhnichna elektrodinamika. Tem. vip. «Silova elektronika ta energoeftivnist'». 2009. Part 2. P. 104]

3. Колесник К.В., Чурюмов Г.И. Аналитический обзор технических средств охраны периметров крупных объектов // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Силовая электроника та енергоефективність». — 2008. — Ч. 5. — С. 127 — 132. [Kolesnik K.V. Churyumov G.I. // Tekhnichna elektrodinamika. Tem. vip. «Silova elektronika ta energoeftivnist'». 2008. Part 5. P. 127]

4. Колесник К.В., Мачехин Ю.П., Чурюмов Г.И. Методы статического моделирования радио-технических систем контроля охранных периметров объектов. // 36. наукових праць ХУПС МО України «Системи обробки інформації». — 2010. — №1 (82). — С. 61 — 65. [Kolesnik K.V., Machekhin Yu.P., Churyumov G.I. // Zb. naukovikh prats' KhUPS MO Ukraini «Sistemi obrobki informatsiyi». 2010. N1 (82). P. 61]

5. Колесник К.В., Мачехин Ю.П., Бондарец А.И. Применение математических методов для анализа эффективности радиотехнических систем контроля пространственных объектов // Матер. XI МНПК «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, г. Одесса. — 2010. — С. 206. [Kolesnik K.V. Machekhin Yu.P. Bondarets A.I. Primenenie matematicheskikh metodov dlya analiza effektivnosti radiotekhnicheskikh sistem kontrolya prostranstvennykh obektov // Mater. XI MNPK «Sovremennye informatsionnye i elektronnye tekhnologii». Ukraine, Odessa. 2010. P. 206]

6. Колесник К.В., Кипенский А.В., Мачехин Ю.П., Чурюмов Г.И. Методика оценки качества радиотехнических систем охраны периметров территориально-распределенных объектов // Материалы XIII МНПК «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, г. Одесса — 2012. — С. 175. [Kolesnik K.V. Kipenskii A.V. Machekhin Yu.P., Churyumov G.I. Metodika otsenki kachestva radiotekhnicheskikh sistem okhrany perimetrov territorial'no-raspredelennykh obektov // Materialy XIII MNPK «Sovremennye informatsionnye i elektronnye tekhnologii». Ukraine, Odessa 2012. P. 175]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 06.06 2012 г.

Kolesnik K. V., Kipenskii A. V., Machekhin Yu. P., Churyumov G. I. **Formal indicators to assess the quality of radio systems perimeter security facilities.**

**Keywords:** radio systems, radio electronic devises, quality assurance.

Quality estimation method based on the use of formal parameters, which greatly simplifies the process of creating effective radio systems for perimeter security of distributed objects in the design phase is proposed.

Ukraine, NTU "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv National University of Radio Electronics.

Колісник К. В., Кіпенський А. В., Мачехін Ю.П., Чурюмов Г. І. **Формалізовані показники для оцінки якості радіотехнічних систем охорони периметрів об'єктів.**

**Ключові слова:** радіотехнічні системи, охорона об'єктів, електронні прилади, забезпечення якості.

Запропоновано метод оцінювання якості, заснований на використанні формальних параметрів, який істотно спрощує процедуру створення ефективних радіотехнічних систем для охорони периметрів територіально розподілених об'єктів на етапі проектування.

Україна, НТУ «Харківський політехнічний інститут», Харківський національний університет радіоелектроніки.

УДК 621.391

А. Н. ШЕЙК-СЕЙКИН

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: ans@irt.opu.ua

## СИНХРОНИЗАЦИЯ ПОТОКОВ ДАННЫХ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ЦОС С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ СТРУКТУРОЙ

*Рассмотрены особенности синхронизации потоков данных в многоканальных системах ЦОС с различной архитектурой. Показано, что в ряде случаев система синхронизации может быть реализована в виде совокупности локальных систем, что позволяет понизить уровень создаваемых ими помех и упростить реализацию за счет сокращения числа глобальных связей. Предложен метод комплексной оценки эффективности реализации (аппаратурных затрат) проектируемой системы с учетом сложности системы синхронизации.*

**Ключевые слова:** система синхронизации, цифровая обработка сигналов, ассоциативная/ранжированная архитектура, формирователь синхросигналов, локальная/глобальная связь.

Реализация систем цифровой обработки сигналов (ЦОС) в реальном времени предъявляет очень жесткие требования к синхронизации процессов обработки данных, связанные с распараллеливанием вычислений, обеспечением работы конвейеров и требованием детерминированности потоков данных в системе [1–3].

Система синхронизации (СНХР) в общем случае может быть либо глобальной, либо быть совокупностью локальных систем. Глобальная система исключает сбой в работе конвейеров, поскольку перезапись входных (выходных) сигналов в вычислительные элементы (ВЭ) системы производится в один и тот же момент времени. Однако такое воздействие СНХР эквивалентно воздействию на систему ЦОС мощной импульсной помехи, особенно на цепи питания и слаботочные цепи, в том числе аналоговые, что приводит к необходимости применения более тщательных мер по снижению влияния таких помех. Кроме того, в системе ЦОС появляются глобальные связи, охватывающие удаленные узлы, что усложняет конструкцию устройства.

Очевидно, что реализация СНХР в виде нескольких локальных систем, вырабатывающих синхросигналы в разнесенные моменты времени, позволяет сократить уровень помех пропорционально количеству этих систем. Кроме того, пропорционально сокращается протяженность и количество линий связи, по которым передают-

ся синхросигналы в один и тот же момент времени. Поэтому такая реализация предпочтительна в плане обеспечения более высокой помехоустойчивости проектируемой системы ЦОС и упрощения ее конструкции.

Настоящая работа посвящена анализу возможности использования локальных СНХР для многоканальных систем ЦОС с перестраиваемой структурой, система обработки потока данных которых имеет различную архитектуру, в частности неперестраиваемую, ассоциативную, ранжированную и архитектуру минимальных перестановок [4–6].

В общем виде СНХР представлена на **рис. 1**. На схеме не приведена структура соединений ВЭ между собой, поскольку она не имеет значения в данном случае.

Варианты структуры УФС, обеспечивающей одновременность передачи синхроимпульсов в линии связи (ЛС), приведены в виде графов на **рис. 2** и отличаются друг от друга числом ступеней усиления и коэффициентом распараллеливания сигналов в усилителях. Узлы графа соответствуют усилительным элементам синхросигналов, а дуги — линиям связи между этими элементами для передачи синхросигналов на ВЭ.

При указанном построении граф оказывается уравновешенным и не требует введения дополнительных элементов задержки для устранения разброса поступления синхросигналов на ВЭ.

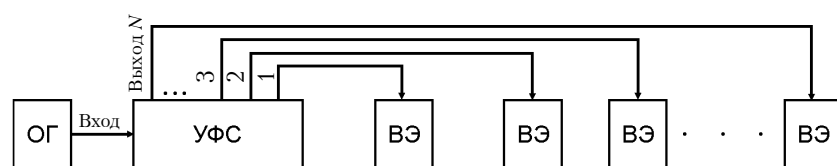


Рис. 1. Структурная схема СНХР в общем виде:

ОГ — опорный генератор; УФС — усилитель-формирователь синхросигналов; ВЭ — вычислительный элемент

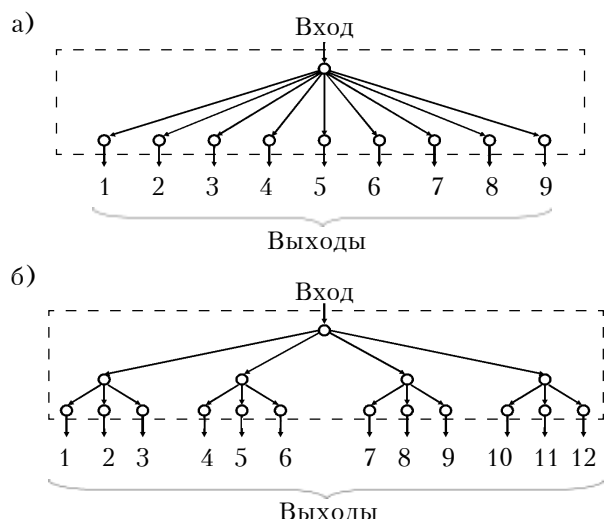


Рис. 2. Варианты структуры УФС синхросистемы:  
а — одноступенчатая; б — двухступенчатая

При этом предполагается, что задержка сигналов в ЛС одинакова, что достигается либо выравниванием длин ЛС между УФС и ВЭ, либо введением дополнительных активных элементов задержки.

Структура, приведенная на рис. 1, содержит  $N$  линий связи, по которым одновременно передаются синхросигналы, при этом  $N=n_B$ , где  $n_B$  — общее количество синхронизируемых ВЭ. Чем меньше  $N$  и чем меньше суммарная длина ЛС, тем меньше нежелательное влияние СНХР на систему ЦОС.

Проведем анализ возможности реализации локальных СНХР для многоканальных систем (МКС) ЦОС с числом каналов  $L$  и различной архитектурой подсистемы обработки потока данных. Будем обозначать входные данные каналов  $DI$ , выходные —  $DO$ , входы синхронизации —  $Vx$ ., выходы синхронизации —  $Вых$ .

#### Неперестраиваемая архитектура

В этом случае система ЦОС представляет собой  $L$  каналов, в каждом из которых происходит обособленная обработка не взаимодействующих между собой потоков данных. Ее структурная

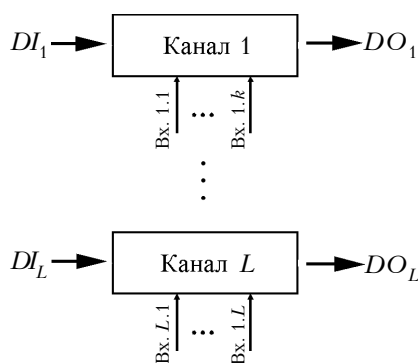


Рис. 3. МКС ЦОС с неперестраиваемой архитектурой

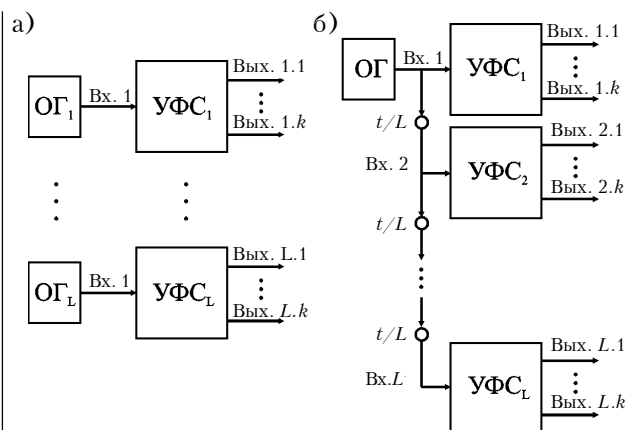


Рис. 4. Структурная схема синхросистемы МКС с неперестраиваемой архитектурой с независимыми (а) и сопряженными (б) каналами синхронизации

схема приведена на рис. 3. Здесь входы синхронизации ВЭ обозначены как  $Vx.l.k$ , где  $l$  соответствует номеру канала, а  $k$  — номеру входа.

Соответственно, в каждом из каналов может быть реализована своя локальная система синхронизации. Сопряжение локальных подсистем между собой может либо вообще отсутствовать (независимые ОГ и УФС), либо формироваться от одного опорного генератора с задержкой сигналов, поступающих на цепи УФС локальных СНХР (рис. 4). Задержка сигналов между системами может быть либо произвольной, либо (для равномерного распределения во времени синхросигналов и, следовательно, вызываемых ими помех) дискретной, равной

$$\Delta t \approx T_0/L, \quad (1)$$

где  $T_0$  — период генерации синхросигналов.

Из рис. 4 видно, что ЛС в этом случае становятся более локальными, поскольку каждый из УФС взаимодействует только с ВЭ одного канала ЦОС. Сокращается в  $N/L$  раз количество одновременно передаваемых сигналов и максимальная протяженность ЛС, что позволяет утверждать о снижении суммарного уровня помех в системе в целом.

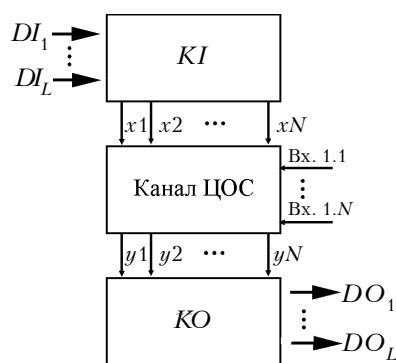


Рис. 5. МКС ЦОС с ассоциативной архитектурой

## Ассоциативная архитектура

Структура системы ЦОС для этого случая приведена на **рис. 5**, где канал ЦОС — суммарный (общий) канал обработки данных,  $KI$  — входной коммутатор размерностью  $L \times N$  (число входов  $\times$  число выходов), а  $KO$  — выходной размерностью  $N \times L$ . При этом любой ВЭ может быть использован в любом канале, поскольку вычислительный ресурс может полностью перераспределяться между каналами [4]. Отсюда следует, что применение ассоциативной архитектуры для обработки потока данных требует применения глобальной СНХР (рис. 1).

## Ранжированная архитектура

Структура такой системы в общем виде приведена на **рис. 6**, где входной ( $KI$ ) и выходной ( $KO$ ) коммутаторы имеют размерность  $L \times L$ .

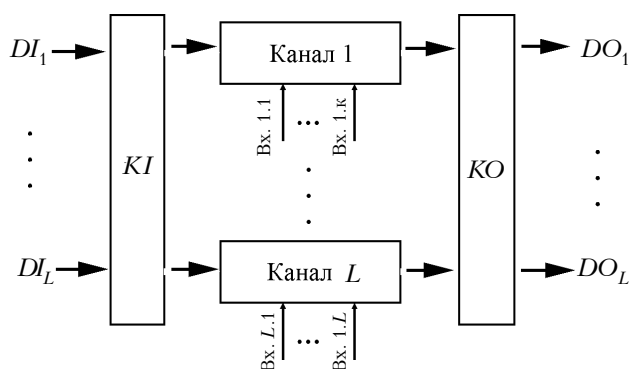


Рис. 6. МКС ЦОС с ранжированной архитектурой

Как показано в [5], структура системы обработки потока данных (СОПД) с ранжированной архитектурой представляет собой  $L$  каналов, в каждом из которых происходит обособленная обработка потоков данных. Однако входные и выходные данные могут поступать из любого/в любой из  $L$  каналов. Поэтому если обеспечить корректную передачу данных во входных и выходных коммутаторах, то можно для такой СОПД применять совокупность локаль-

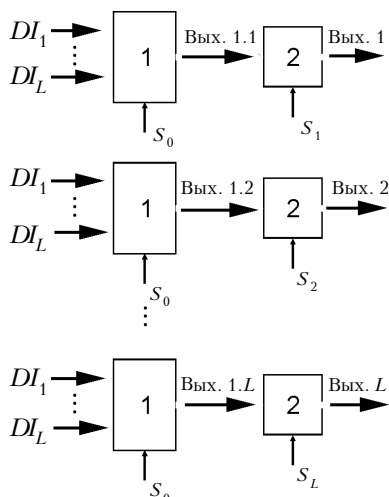


Рис. 7. Фрагмент структуры системы ЦОС с ранжированной архитектурой

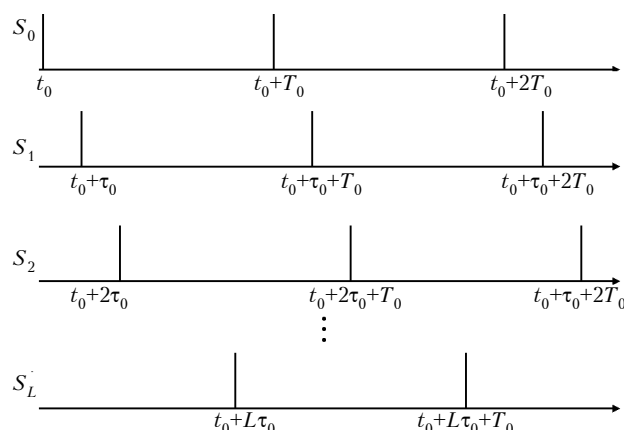


Рис. 8. Временные диаграммы синхросигналов в системе с ранжированной архитектурой

ных СНХР. Рассмотрим условия для такой реализации.

На **рис. 7** приведен фрагмент СОПД с ранжированной архитектурой, включающий в себя входные коммутаторы 1, образующие коммутатор  $KI$ , и первые ступени каналов обработки 2. Сигналы тактирования обозначены как  $S_i$ .

Пусть входные данные фиксируются во входных коммутаторах сигналами  $S_0$  в моменты времени  $t_0$  с периодом  $T_0$ . Если максимально возможное время прохождения сигнала через цепи коммутаторов  $\tau_{\max}$  не превышает некоторую величину  $\tau_0$ , то фиксация данных во входных цепях каналов обработки сигналами  $S_i$  в моменты времени  $t_i$ , определяемые из условия

$$t_i = t_0 + i\tau_0, \quad i \in \overline{1, L}, \quad \tau_{\max} < \tau_0 \leq T_0 / L, \quad (2)$$

обеспечивает корректную передачу данных со входов системы на каналы обработки (**рис. 8**).

Структурная схема СНХР для ранжированной архитектуры СОПД приведена на **рис. 9**, где УФС<sub>0</sub> синхронизирует систему входных коммутаторов, УФС<sub>1</sub> ... УФС<sub>L</sub> — работу каналов обработки,  $\tau_0$  — элементы задержки синхросигналов. Из этого рисунка видно, что СНХР си-

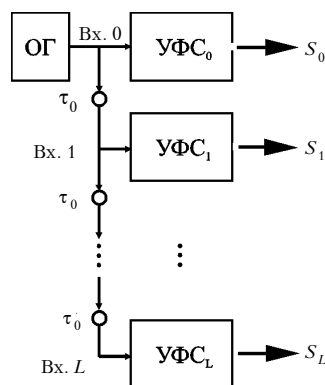


Рис. 9. Структурная схема системы синхронизации МКС с ранжированной архитектурой



системы разделяется на  $L$  локальных структур, что существенно сокращает число одновременно передаваемых синхросигналов и максимальную протяженность ЛС, а следовательно — снижает и суммарный уровень помех в системе в целом.

#### Архитектура «минимальных перестановок»

Структура системы в общем виде приведена на рис. 10, где входной коммутатор  $KI$  имеет размерность  $(L+N) \times N$ , выходной  $KO$  — размерность  $N \times (L+N)$ , канал ЦОС — суммарный (общий) канал обработки данных.

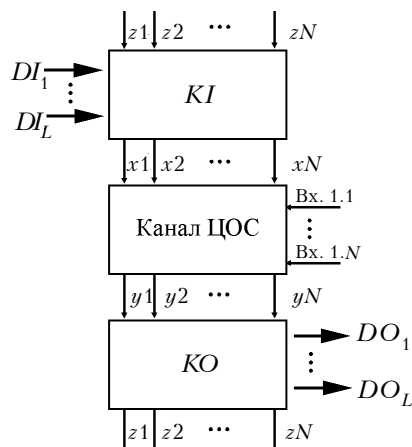


Рис. 10. МКС ЦОС с архитектурой «минимальных перестановок» [6]

В этом случае, как и в системе с ассоциативной архитектурой, нет четко выраженных обособленных участков системы обработки. Поэтому здесь также необходимо применять глобальную структуру синхронизации (рис. 1).

Таким образом, в МКС ЦОС с ассоциативной архитектурой и архитектурой минимальных перестановок необходимо применять глобальную систему синхронизации, а в системах с ранжированной архитектурой — совокупность локальных синхросистем, сопряженных между собой согласно условию (2). В системах с неперестраиваемой архитектурой можно использовать совокупность либо не связанных между собой, либо сопряженных друг с другом в соответствии с формулой (1) локальных СНХР. Все это существенно влияет на итоговую оценку эффективности применения той или иной архитектуры для реализации системы ЦОС. Поэтому при выборе архитектуры системы ЦОС в целом необходимо сопоставлять не только аппаратные затраты на реализацию ее СОПД, определяемые в основном количеством ВЭ и коммутационных элементов (КЭ) [4–6], но и сложность реализации СНХР. Приведем рекомендации по такому сопоставлению.

По аналогии с [4–6], оценка суммарных аппаратных затрат может быть представлена в виде

$$Q_0 = Q_B + \gamma_K Q_K + \gamma_C Q_C, \quad (3)$$

где  $Q_B$  — количество ВЭ в системе;

$Q_K$  — количество КЭ в системе;

$\gamma_K$  — коэффициент относительной сложности реализации КЭ по сравнению с ВЭ;

$Q_C$  — объем системы синхронизации;

$\gamma_C$  — коэффициент относительной сложности реализации СНХР по сравнению с ВЭ.

В свою очередь  $Q_C$  также может быть представлен в виде взвешенной суммы компонентов, входящих в состав СНХР, — усилительных элементов (УЭ) и ЛС различной протяженности (степени локальности/глобальности), например:

$$Q_C = \gamma_{C0} Q_{C0} + \sum_{i=1}^m \gamma_{Ci} Q_{Ci}, \quad (4)$$

где  $Q_{C0}$  — общее количество УЭ, входящих в состав системы синхронизации;

$\gamma_{C0}$  — коэффициент относительной сложности реализации УЭ по сравнению с ВЭ;

$Q_{Ci}$  — количество ЛС определенной степени локальности/глобальности;

$\gamma_{Ci}$  — коэффициент относительной сложности реализации ЛС данного типа по сравнению с ВЭ;

$m$  — количество типов ЛС.

Очевидно, что детализация выражений (3) и (4) представляет собой весьма сложную и трудоемкую задачу и зависит от конкретного способа реализации проектируемой системы. Однако, несмотря на возможную субъективность и погрешность определения коэффициентов относительной сложности, приведенный подход позволяет сравнивать между собой различные варианты реализации систем ЦОС и должен облегчить выбор оптимального решения.

Таким образом, можно резюмировать следующее.

1. Система синхронизации может быть либо глобальной, либо совокупностью локальных систем. Если в структуре СОПД можно выделить четко выраженные обособленные участки, то для них целесообразно применять локальную структуру синхронизации, в противном случае применяется глобальная структура.

2. Сопряжение локальных структур между собой в общем случае должно удовлетворять условию (2), если потоки данных синхронизированы между собой, и условию (1) либо вообще отсутствовать, если потоки несинхронизированы.

3. При комплексной оценке эффективности применения той или иной архитектуры системы ЦОС необходимо сопоставлять не только аппаратные затраты на реализацию СОПД, но и сложность реализации системы синхронизации.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Воеводин В.В. Математические модели и методы в параллельных процессах. — Москва: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит. — 1986. [Voevodin V.V. Matematicheskie modeli i metody v parallel'nykh protsessakh. Moscow: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit. 1986]

2. Каляев А.В. Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой. — Москва: Радио и связь, 1984. [Kalyaev A.V. Mnogoprotsessornye sistemy s programmiruemoi arkhitekturoi. Moscow: Radio i svyaz', 1984]

3. Севбо В., Орлов А., Лошаков А. Многопроцессорный вычислительный комплекс для задач «жесткого» реального времени // Современные технологии автоматизации. — 2007. — №3. — С.32—38. [Sevbo V., Orlov A., Loshakov A. // Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii. 2007. N 3. P. 32]

4. Баранов П.Е., Шейк-Сейкин А.Н. Многоканальный цифровой фильтр сжатия с ассоциативной архитектурой // Труды Одесского политехнического университета. — 2010. — Вып. 1(33)—2(34) — С. 166—171. [Baranov P.E., Sheik-Seikin A.N. // Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta. 2010. Iss. 1(33)—2(34) P. 166]

5. Баранов П.Е., Шейк-Сейкин А.Н. Многоканальные устройства цифровой обработки сигналов с ранжированной архитектурой // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010. — №3. — С. 25—28. [Baranov P.E., Sheik-Seikin A.N. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2010. N 3. P. 25]

6. Шейк-Сейкин А.Н. Архитектура устройств цифровой обработки сигналов с перестраиваемой структурой // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. — №4. — С. 10—14. [Sheik-Seikin A.N. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. 2011. N 4. P. 10]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 06.04 2012 г.*

**Sheik-Seikin A.N. Synchronization of data flows in multichannel systems of digital signals processing with configurable structure.**

*Keywords: synchronizing system, digital processing of signals, associative/ranked architecture, sync signals shaper, local/global connection.*

The special features of the synchronization of data flows in the multichannel DSP systems with different architecture are examined. It is shown that in a number of cases the timing system can be realized in the form of a totality of local systems, which makes it possible to lower the level of the interferences created by them and to simplify their realization due to the reduction of the number of global connections. The method of the integrated assessment of the realization efficiency (equipment expenditures) of the projected system taking into account the complexity of timing system is proposed.

Ukraine, Odessa national polytechnic university.

**Шейк-Сейкін А.М. Синхронізація потоків даних у багатоканальних системах цифрової обробки сигналів з перестроюваною структурою.**

*Ключові слова: система синхронізації, цифрова обробка сигналів, асоціативна/ранжирована архітектура, формувач синхросигналів, локальний/глобальний зв'язок.*

Розглянуто особливості синхронізації потоків даних у багатоканальних системах ЦОС з різною архітектурою. Показано, що у деяких випадках система синхронізації може бути реалізована у вигляді сукупності локальних систем, що дозволяє знизити рівень створених ними перешкод та спростити реалізацію за рахунок скорочення числа глобальних зв'язків. Передбачено метод комплексної оцінки ефективності реалізації (апаратних витрат) проектованої системи з урахуванням складності системи синхронізації.

Україна, Одеський національний політехнічний університет.

І І АУ А ЕІ ЕАЕ

І І АУ А ЕІ ЕАЕ



**Сырчин В. К., Зарянкин Н. М., Виноградов А. И. Технологические процессы и оборудование производства электронных средств. Ч. 1. Вакуумно-плазменные процессы и оборудование.— Москва: ИПК МИЭТ, 2011.— 167 с.**

Изложены вопросы физики газовых разрядов, физико-химических процессов в газоразрядной плазме и механизмов взаимодействия ионов и химически активных частиц, генерируемых в плазме, с поверхностью обрабатываемого материала. Представленный материал охватывает физико-химические процессы, на основе которых реализуются технологические процессы в базовых видах технологического оборудования для производства приборов микро- и нанoeлектроники, а также изделий микросистемной техники: нанесения и травления материалов в вакууме. Пособие содержит тот минимум знаний, который необходимо освоить студенту на уровне общего представления о вакуумно-плазменных процессах в современном серийном технологическом оборудовании. Предназначено для студентов направления «Электроника и нанoeлектроника», изучающих дисциплину «Вакуумно-плазменные процессы и оборудование».

УДК 621.387.4

Д. т. н. Н. Г. СТАРЖИНСКИЙ, акад. НАНУ Б. В. ГРИНЁВ,  
 д. ф.-м. н. В. Д. РЫЖИКОВ, д. ф.-м. н. Ю. В. МАЛЮКИН, А. В. ЖУКОВ,  
 к. ф.-м. н. О. Ц. СИДЛЕЦКИЙ, И. М. ЗЕНЯ, А. И. ЛАЛАЯНЦ

Украина, г. Харьков, Институт сцинтилляционных материалов НАНУ

E-mail: ns@isma.kharkov.ua

## ШИРОКОЗОННЫЕ ХАЛЬКОГЕНИДНЫЕ СЦИНТИЛЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ $A^{II}B^{VI}$

*Рассмотрены особенности получения халькогенидных сцинтилляторов (ХС) на основе сульфида и селенида цинка. Исследования показали, что полученные сцинтилляторы обладают высоким световыходом, низким послесвечением, малым временем высвечивания, низким значением эффективного атомного номера ( $Z_{эфф}=26-33$ ), большой шириной запрещенной зоны ( $E_g=2,8-3,6$  эВ), высокой термостабильностью выходных параметров. Показана перспективность их применения в различных устройствах современного радиационного приборостроения.*

**Ключевые слова:** кристаллы  $A^{II}B^{VI}$ -соединений, сульфид цинка, сцинтилляционные характеристики, центры люминесценции, халькогенидные сцинтилляторы.

Для систем мультэнергетической цифровой рентгеновской радиографии (МЦРР) необходимы материалы со следующими характеристиками: высокий световыход, быстрая кинетика высвечивания, низкий уровень запаса энергии, высокая климатическая и радиационная стабильность выходных параметров, а также оптимальное, в зависимости от функциональных особенностей детектирующего тракта, значение эффективного атомного номера  $Z_{эфф}$  [1]. Среди лучших материалов для применения в МЦРР, особенно в низкоэнергетической системе детектирования, можно выделить халькогенидные сцинтилляторы (ХС) на основе селенида цинка, легированные изovalентными примесями ( $ZnSe(Te)$ ,  $ZnSe(Cd, Te)$ ) [2, 3]. Сцинтилляторы этого типа имеют максимум эмиссии в области длины волны излучения 630–640 нм, световыход, сравнимый со световыходом кристалла  $CsI(Tl)$ , уровень послесвечения  $\eta > 0,05\%$ . Однако известные сцинтилляционные материалы на основе селенида цинка обладают рядом свойств, которые не в полной мере отвечают предъявляемым требованиям: низкой температурной стабильностью световыхода, большим временем высвечивания, высоким самопоглощением собственного излучения и др. [4, 5].

Одним из путей улучшения выходных параметров ХС на основе соединений  $A^{II}B^{VI}$  является использование сульфида цинка в качестве кристалла-матрицы, а также в качестве активирующей примеси в ХС на основе  $ZnSe(\Sigma X)$ , где  $\Sigma X$  — изovalентные примеси [6, 7]. Это обусловлено тем, что  $ZnS$  имеет более высокую прозрачность к собственному излучению, чем  $ZnSe$ , самое низкое значение эффективного атомного номера среди соединений  $A^{II}B^{VI}$  ( $Z_{эфф}=24$ ) и наибольшую

ширину запрещенной зоны ( $E_g \approx 3,6$  эВ). То есть можно предположить, что сцинтилляционные материалы, содержащие сульфид цинка, могут быть во многом лишены недостатков ХС типа  $ZnSe(Te)$ , и поэтому их создание и исследование является весьма перспективным направлением в области сцинтилляционного материаловедения.

В настоящей работе рассмотрены методы получения новых ХС на основе твердых растворов  $ZnS-ZnSe$  и  $ZnSe-ZnS$ , изучены их основные физико-химические, оптические и сцинтилляционные характеристики.

### Получение сцинтилляционных материалов

Кристаллы выращивались методом Бриджмена — Стокбаргера в графитовых тиглях под давлением инертного газа ( $Ar$ ,  $P=10^7-10^9$  Па) при температуре роста  $T_{рост}=1600-1800$  К; скорость протяжки тигля через зону максимального температурного градиента составляла  $v=5-7$  мм/ч. Для кристаллов  $ZnS(\Sigma X)$  исходная шихта проходила предварительную очистку в восстановительной атмосфере. Молярная доля активирующей примеси  $Se$  в кристаллах  $ZnS(Se, Al)$  составляла 10–50%, концентрация примеси  $S$  в кристаллах  $ZnSe(S)$ ,  $ZnSe(S, Al)$  — 3–5%, примеси  $Al$  —  $1 \cdot 10^{-1}-1 \cdot 10^{-3}\%$ , прочих примесей — не более  $3 \cdot 10^{-5}\%$ . Для окончательного формирования излучательных центров, а также для подавления безызлучательных каналов релаксации возбужденных носителей заряда часть кристаллов ( $ZnSe(S)$ ,  $ZnS(Se)$ ) отжигалась в парах цинка ( $T=1300$  К,  $P=5 \cdot 10^7$  Па, время отжига 24–48 ч). Кристаллы типа  $ZnS(Te)$  проходили термообработку в атмосфере  $Ar$  ( $T=1300$  К в течение 24–72 ч) [7]. Размеры образцов составляли  $10 \times 10 \times 1$  и  $10 \times 10 \times 2$  мм.

## Оборудование для исследований

Оптические и люминесцентные характеристики изучали с помощью спектрально-измерительного комплекса КСВУ-2 с монохроматором МДР-23 и фотоприемником ФЭУ-62. В качестве источника возбуждающего излучения использовали рентгеновский аппарат РЕЙС-И ( $U_a=45$  кВ,  $i_a=25$  мкА). При измерениях температурных зависимостей световыход использовался азотный криостат с блоком регулировки температуры РП1-16А. Измерения относительного световыхода  $S_{отн}$  проводили с использованием рентгеновского источника ИРИ (100 кВ, 1 мА), вольтметра В7-35 и Si-фотодиода ФД-288, в качестве эталона сцинтиллятора использовали кристалл  $CdWO_4$  (CWO). Время высвечивания  $\tau$  измеряли с помощью цифрового осциллографа RIGOL DS1302CA, фотоприемника ФЭУ-35А и импульсного рентгеновского источника МИРА-2Д (200 кВ, длительность импульса 10 нс). Уровень послесвечения  $\eta$  измеряли с помощью измерительно-вычислительного комплекса RAPAN 200/100.

## Исследование характеристик

Основные характеристики ХС представлены в **таблице**, где для сравнения приведены выходные параметры типичного оксидного сцинтиллятора CWO.

У ХС на основе твердых растворов  $ZnS-ZnSe$  эффективный атомный номер  $Z_{эфф}=26$ , что позволяет создавать детекторы для низкоэнергетической подсистемы МЦРР с улучшенным разделением по плотности исследуемых объектов по сравнению с ХС на основе  $ZnSe(\Sigma X)$ , у которых  $Z_{эфф}=33$ .

Высокий световыход полученных материалов, сравнимый с  $S_{отн}$  одного из лучших ХС —  $ZnSe(Te)$ , в совокупности с низким значением  $Z_{эфф}$  позволяет без потери разрешения значительно снизить дозовые радиационные нагрузки как на объект, так и на обслуживающий персонал.

В ходе отжига в парах  $Zn$  происходит подавление безызлучательных каналов релаксации, в результате чего после отжига уровень послесвечения снижается на 1–2 порядка. Отжиг в парах  $Zn$  является необходимым этапом при получении материалов типа  $ZnSe(Te)$ ,  $ZnSe(S)$ ,  $ZnS(Te)$  и  $ZnS(Se)$ .

## Основные характеристики халькогенидных сцинтилляторов

| Кристалл     | $Z_{эфф}$ | $S_{отн}$ | $\eta$ через 20 мс, % | $\tau$ , мкс | $\lambda_{max}$ , нм |
|--------------|-----------|-----------|-----------------------|--------------|----------------------|
| $ZnSe(Te)$   | 33        | 1,7–2,5   | 0,05                  | 30–120       | 630–640              |
| $ZnS(Te)$    | 26        | 0,9–1,2   | $\leq 2$              | 0,2–0,3      | 420/570              |
| $ZnS(Se)$    | 26        | 1,4–1,6   | 0,05                  | 0,1–0,2      | 575–580              |
| $ZnSe(S)$    | 33        | 1,3–1,9   | $<0,01$               | 1–5          | 590–600              |
| $ZnSe(S,Al)$ | 33        | 1,7–2,4   | $<0,05$               | 0,9–2,5      | 610–620              |
| $ZnS(Se,Al)$ | 26        | 1,2–2,1   | $<0,04$               | 0,2–0,3      | 490–600              |
| CWO          | 66        | 1         | $<0,005$              | 20           | 490                  |

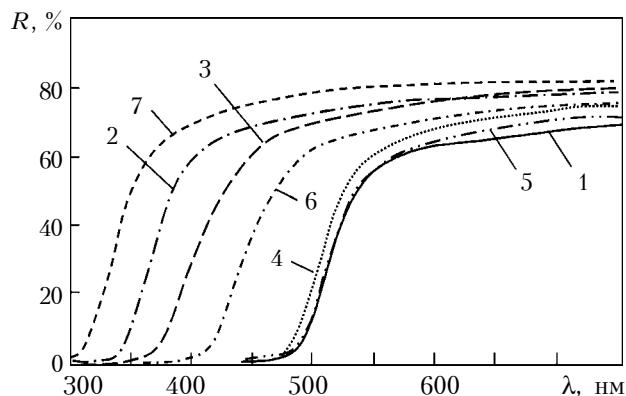


Рис. 1. Спектры оптического пропускания различных ХС:

1 —  $ZnSe(Te)$ ; 2 —  $ZnS(Te)$ ; 3 —  $ZnS(Se)$ ; 4 —  $ZnSe(S)$ ; 5 —  $ZnSe(S, Al)$ ; 6 —  $ZnS(Se, Al)$ ; 7 —  $ZnS$

Введение в исходную шихту неизовалентной донорной примеси типа  $Al$  приводит к образованию дополнительных свободных носителей заряда (двухвалентные атомы  $Zn^{2+}$  замещаются трехвалентными атомами  $Al_{Zn}$ ), которые могут заполнять ловушки, тем самым снижая уровень послесвечения ХС типа  $ZnSe(S, Al)$ . Такое легирование позволяет исключить из процесса получения ХС дополнительный энергоемкий этап — послеростовой отжиг в парах  $Zn$ .

Сцинтилляторы  $ZnS(\Sigma X)$  обладают высоким оптическим пропусканием ( $R=75-80\%$ ), близким к значению для нелегированного  $ZnS$  (рис. 1, кривые 2, 3, 6). Край поглощения смещен в коротковолновую область, что связано со значительной разницей в значениях ширины запрещенной зоны  $ZnS(\Sigma X)$  ( $E_g=3,6$  эВ) и  $ZnSe(\Sigma X)$  ( $E_g=2,8$  эВ). Значение оптического пропускания сцинтилляторов  $ZnSe(S)$  и  $ZnSe(S, Al)$  на 5–10% выше, чем у  $ZnSe(Te)$  ( $R=60-65\%$ ). Введение серы в кристаллы  $ZnSe$ , в отличие от активирующей примеси  $Te$ , приводит к улучшению оптического пропускания в области их собственного излучения. Высокая оптическая прозрачность кристаллов типа  $ZnS(\Sigma X)$  позволяет увеличивать размеры сцинтилляционных элементов и существенно расширить область их практического применения.

Спектры излучения всех ХС, кроме  $ZnS(Te)$  ( $\lambda_{max1}=420$  нм,  $\lambda_{max2}=570$  нм) и оксидного сцинтиллятора CWO ( $\lambda_{max}=490$  нм), находится в красной области спектра ( $\lambda_{max}=580-640$  нм) (рис. 2). Для кристалла  $ZnS(Se)$  наблюдается существенное смещение максимума спектра излучения в красную область после отжига в парах  $Zn$  — с 520 до 575–580 нм. Следует отметить, что смещенный в красную область спектр излучения большинства ХС существенно улучшает спек-

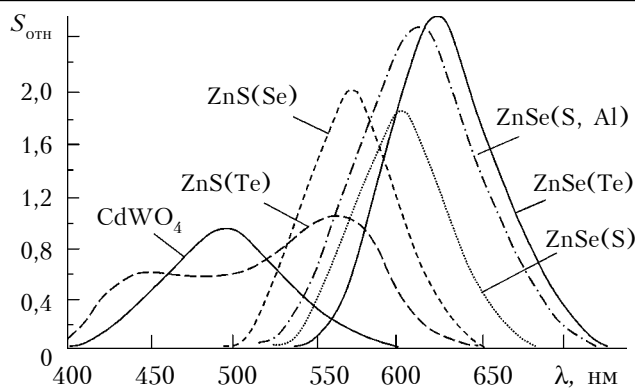


Рис. 2. Спектры рентгенолюминесценции ХС

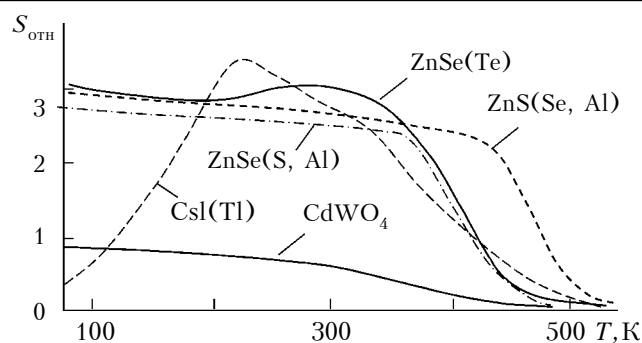


Рис. 3. Зависимость световыхода различных ХС от температуры

тральное согласование с Si-фотодиодами, повышая тем самым радиационную чувствительность детекторов типа «сцинтиллятор — фотодиод».

Время высвечивания  $\tau$  кристаллов типа ZnSe(S) на порядок, а ZnS(Se) на два порядка меньше, чем у кристаллов ZnSe(Te). Это может быть связано с тем, что примесные атомы S и Se в отличие от атомов Te не являются изовалентными центрами промежуточного захвата носителей заряда [8]. Такие особенности кинетики высвечивания ХС на основе ZnS позволяют создавать детектирующие тракты с повышенным быстродействием и пространственно-временным разрешением, работающие в режиме реального времени.

Исследования температурных зависимостей показали, что материалы типа ZnS( $\Sigma$ X) имеют более высокую температурную стабильность параметров, чем материалы на основе селенида цинка, а также CWO и CsI(Tl). Отклонение величины световыхода при увеличении температуры  $T$  в диапазоне от 80 до 450 K для материала ZnS(Se, Al) не превышает 5–8% (рис. 3). Термогашение люминесценции для кристаллов типа ZnS(Se, Al) происходит в области 450–500 K, что позволяет создавать на их основе более термоустойчивые сцинтилляторы, чем на основе кристаллов ZnSe(Te), а также оксидных и щелочно-галогенидных сцинтилляторов.

Известно, что для кристаллов ZnSe(Te) центрами свечения являются термодинамически стабильные комплексы типа  $\text{Te}_{\text{Se}}\text{V}_{\text{Zn}}^{\cdot-}$ , для кристаллов ZnSe(O) —  $\text{O}_{\text{Se}}\text{Zn}_i\text{V}_{\text{Zn}}^{\cdot-}$  [8–10]. Как показано в [11, 12], атомы S и Se являются кислородоподобными примесями для кристаллов селенида и сульфида цинка соответственно. Можно предположить, что центры свечения для кристаллов типа ZnSe(S) представляют собой комплексы  $\text{S}_{\text{Se}}\text{Zn}_i\text{V}_{\text{Zn}}^{\cdot-}$ , а для кристаллов типа ZnS(Se) — комплексы  $\text{Se}_{\text{S}}\text{Zn}_i\text{V}_{\text{Zn}}^{\cdot-}$ . Термодинамические расчеты показывают возможность образования стабильных триплетов такого типа в ХС [13].

Наблюдаемое увеличение прозрачности и термостабильности параметров кристаллов ХС ZnS( $\Sigma$ X) по сравнению с легированными кристаллами селенида цинка можно объяснить следующим. Ширина запрещенной зоны ZnS( $\Sigma$ X) заметно больше, чем у ZnSe( $\Sigma$ X) — соответственно, 3,6 и 2,8 эВ (рис. 4). При примерно одинаковой энергии излучаемых фотонов этих кристаллов ( $h\nu \approx 2$  эВ, излучательные переходы «зона проводимости — центр свечения А») энергия активации термогашения люминесценции для ZnS( $\Sigma$ X)  $E_{a2}$  на 0,8 эВ больше, чем  $E_{a1}$  для ZnSe( $\Sigma$ X). Поэтому термоионизация центров свечения в ХС на основе ZnS( $\Sigma$ X) происходит при температуре на 70–80 K выше, чем в ХС на основе ZnSe.

Кроме того, максимум спектра излучения ХС типа ZnS( $\Sigma$ X) находится дальше от края поглощения, чем для ZnSe( $\Sigma$ X), что обуславливает их разницу в прозрачности для собственного излучения.

### Выводы

В результате исследования свойств новых сцинтилляционных материалов типа ZnS(Se, Al) и ZnSe(S, Al) установлено, что они обладают рядом преимуществ перед существующими оксидными, щелочно-галогенидными и халькогенидными сцинтилляторами. Они позволяют существенно увеличить быстродействие систем мультиспектральной

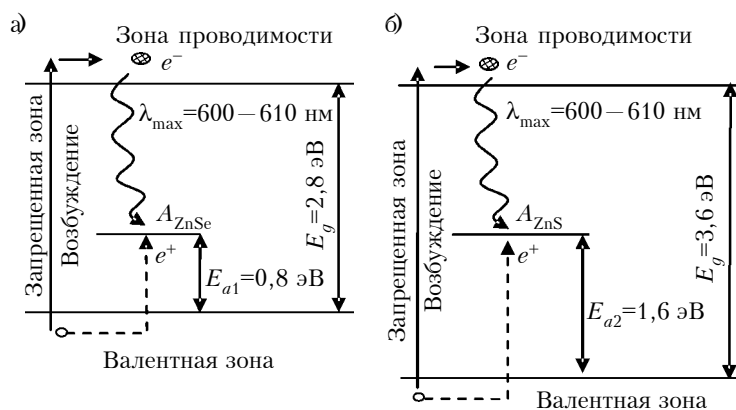


Рис. 4. Энергетическая структура излучательных процессов в ХС на основе ZnSe (а) и ZnS (б)



тической цифровой рентгеновской радиографии и других радиационно-чувствительных устройств. Низкое значение эффективного атомного номера  $Z_{\text{эфф}}$  у таких материалов позволяет получать детальную информацию от объектов с низкой плотностью, высокая термостабильность выходных параметров повышает эксплуатационную надежность систем радиографии и достоверность получаемых результатов, а высокий световыход позволяет снизить радиационную нагрузку на изучаемый объект и обслуживающий персонал.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гринёв Б. В., Рыжиков В. Д., Семиноженко В. П. Сцинтилляционные детекторы и системы контроля радиации на их основе. — Киев: Наукова думка, 2007. [Grinyov B. V., Ryzhikov V. D., Seminozhenko V. P. Stsintillyatsionnye detektory i sistemy kontrolya radiatsii na ikh osnove. Kiev. Naukova Dumka. 2007]
2. Ryzhikov V., Starzhinskiy N., Katrunov K., Gal'chinskii L. Absolute light yield of ZnSe(Te) and ZnSe(Te, O) scintillators // Functional Materials. — 2002. — Vol. 9, N 1. — P. 135–138.
3. Пат. 74998 Украины. Способ получения сцинтилляционного материала на основе активированного селенида цинка / Н. Г. Старжинский, Б. В. Гринёв, К. А. Катрунов и др. — 2006. — Бюл. № 2. [Pat. 74998 Ukrainy. N. G. Starzhinskii, B. V. Grinyov, K. A. Katrunov i dr. 2006. Bull. N 2]
4. Starzhinskiy N., Grinyov B., Zhenya I. et al. New trends in development of  $A^{II}B^{VI}$ -based scintillators // IEEE Trans. Nucl. Sci. — 2008. — Vol. 55, N 3. — P. 1542–1546.
5. Ryzhikov V., Starzhinskiy N., Katrunov K., Gal'chinskii L. Absolute light yield of ZnSe(Te) and ZnSe(Te, O) scintillators // Functional Materials. — 2002. — Vol. 9, N 1. — P. 135–138.
6. Старжинский Н. Г., Жуков А. В., Рыжиков В. Д. и др. Перспективные разработки сцинтилляторов на основе широкозонных бинарных полупроводниковых материалов // Тр. Междунар. конфер. студентов и молодых ученых по теоретической и экспериментальной физике «Эврика-2012». Украина, г. Львов. — 2012. — С. 2. [Starzhinskii N. G., Zhukov A. V., Ryzhikov V. D. i dr. // Tr. Mezhdunar. konfer. studentov i molodykh uchenykh po teoreticheskoi i eksperimental'noi fizike "Evrika-2012". Ukraine, L'vov. 2012. P. 2]
7. Катрунов К. А., Лалаянц А. И., Гальчинецкий Л. П. и др. Эффективные сцинтилляционные материалы на основе твердых растворов  $ZnS_{1-x}Te_x$  и перспективы их применения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. — № 1–2. — С. 60–64. [Katrunov K. A., Lalayants A. I., Gal'chinskii L. P. i dr. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparatyre. 2011. N 2. P. 60]
8. Старжинский Н. Г., Гринёв Б. В., Гальчинецкий Л. П., Рыжиков В. Д. Сцинтилляторы на основе соединений  $A^{II}B^{VI}$ . Получение, свойства и особенности применения. — Харьков: Институт монокристаллов, 2007. [Starzhinskii N. G., Grinyov B. V., Gal'chinskii L. P., Ryzhikov V. D. Stsintillyatory na osnove soedinenii  $A^{II}B^{VI}$ . Poluchenie, svoystva i osobennosti primeneniya. Khar'kov. Institut monokristallov. 2007]
9. Ryzhikov V. D., Starzhinskiy N. G., Gal'chinskii L. P. et al. The role of oxygen in formation of radiative recombination centers in  $ZnSe_{1-x}Te_x$  crystals // International Journal of Inorganic Materials. — 2001. — Vol. 8, N 3. — P. 1227–1229.
10. Ryzhikov V., Gashin P., Starzhinskiy N. et al. Luminescence properties of isovalently doped ZnSe crystals // Functional Materials. — 2003. — Vol. 10, N 2. — P. 207–210.
11. Koshkin V. M., Zazunov A. L., Ryzhikov V. D. et al. Thermodynamic and radiation peculiarities of isovalently doped semiconductor compounds // Book of Abstracts of 16<sup>th</sup> IUPAC Conference on Chemical Thermodynamics. — Canada, Halifax. — 2000. — P. 38.
12. Koshkin V. M., Dulfan A. Ya., Ganina N. V. et al. Tellurium, sulfur, and oxygen isovalent impurities in ZnSe semiconductor // Functional Materials. — 2002. — Vol. 9, N 3. — P. 438–441.
13. Атрощенко Л. В., Гринёв Б. В., Рыжиков В. Д. и др. Кристаллы сцинтилляторов и детекторы ионизирующих излучений на их основе. — Киев: Наукова думка, 1998. [Atroshchenko L. V., Grinyov B. V., Ryzhikov V. D. i dr. Kristally stsintillyatorov i detektory ioniziruyushchikh izluchenii na ikh osnove. Kiev. Naukova dumka. 1998]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 05.06 2012 г.

Starzhinskiy N. G., Grinyov B. V., Ryzhikov V. D., Maliykin Yu. V., Zhukov A. V., Sidletskiy O. Ts., Zhenya I. M., Lalayants A. I. **Wide-band chalcogenide scintillators on the basis of  $A^{II}B^{VI}$  compounds.**

*Keywords: crystals of  $A^{II}B^{VI}$  compounds, zinc sulfide, scintillation characteristics, luminescence centers, chalcogenide scintillators.*

The formation characteristics of chalcogenide scintillators (CS) based on zinc sulfide and selenide are considered. The research has shown that such scintillators have high specific light yield, low afterglow level, short luminescence time, low value of the effective atomic number ( $Z_{\text{eff}}=26-33$ ), large band gap ( $E_g=2,8-3,6$  eV), high thermal stability of output parameters. The prospects of use of such scintillators in various devices of modern radiation instrumentation has been shown.

Ukraine, Kharkov, Institute for Scintillation Materials of NAS of Ukraine.

Старжинський М. Г., Гриньов Б. В., Рижиков В. Д., Малюкін Ю. В., Жуков А. В., Сідлецький О. Ц., Зеня І. М., Лалаянц А. І. **Широкозонні халькогенідні сцинтилятори на основі сполук  $A^{II}B^{VI}$ .**

*Ключові слова: кристали  $A^{II}B^{VI}$ -сполук, сульфід цинку, сцинтиляційні характеристики, центри люмінесценції, халькогенідні сцинтилятори.*

Розглянуто особливості отримання халькогенідних сцинтиляторів на основі сульфідів та селенідів цинку. Дослідження показали, що отримані сцинтилятори мають високий світловихід, низьке післясвітіння, малий термін висвічування, низьке значення ефективного атомного номеру ( $Z_{\text{эфф}}=26-33$ ), велику ширину забороненої зони ( $E_g=2,8-3,6$  эВ), високу термостабільність вихідних параметрів. Показано перспективність їх використання у різних приладах сучасного радіаційного приладобудування.

Україна, м. Харків, Інститут сцинтиляційних матеріалів НАНУ.

УДК 620.168.001.2

К. ф.-м. н. М. В. ДМИТРИЕВ, к. т. н. И. Н. ЕРИМИЧОЙ, к. т. н. Л. И. ПАНОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: panov.leonid@gmail.com

## ПРОГНОЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СТЕКЛОКЕРАМИКЕ ДЛЯ РАЗНЫХ СООТНОШЕНИЙ МАССОВЫХ ДОЛЕЙ КОМПОНЕНТОВ

*Предложен инженерный метод прогнозирования диэлектрических потерь в двухкомпонентной стеклокерамике без пор, позволяющий при ее разработке сократить время и средства на проведение экспериментов и расчетов.*

*Ключевые слова: стеклокерамика, диэлектрические потери, комплексный метод исследования, ускорение разработки композитов.*

К числу перспективных диэлектриков относится стеклокерамический композит (**СК**) [1], который обладает достоинствами композиционных и керамических материалов и представляет собой стеклянную матрицу с включениями тугоплавких частиц  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Он экспрессно спекается при 800–900°C и успешно конкурирует с энергоемкой алюмооксидной керамикой в изделиях радиоэлектроники, поскольку имеет лучшие технические характеристики и технологические преимущества. Отсутствие в нем пор позволяет точнее воспроизводить его параметры и повысить процент выхода годных изделий.

При разработке СК лишь экспериментальными методами затраты времени на проведение опытов для выбора оптимального варианта столь велики, что результат поиска морально устаревает, проигрывая в рыночной конкуренции. Это связано с тем, что число факторов, неоднозначно влияющих на свойства синтезируемого СК, очень велико. К ним относятся состав и свойства применяемого стекла, свойства наполнителя, технологические режимы изготовления компонентов и композита, чистота используемых материалов и другие.

В доступных источниках опубликованы лишь конечные результаты изготовления СК, а информация о способах ускорения разработки таких материалов практически отсутствует. Однако создание новых методов, совмещающих эксперимент и теорию, которые позволили бы сократить долю длительных и дорогостоящих опытов и тем самым обеспечивали бы конкурентоспособность создаваемых СК, является актуальной на сегодняшний день задачей.

Целью настоящей работы было создание простого, пригодного для инженерных расчетов метода прогнозирования эффективной величины тангенса угла диэлектрических потерь (**ТУДП**)

в СК ( $\text{tg}\delta_k$ ) для различного соотношения массовых долей компонентов. В задачу входило получение формулы для вычисления  $\text{tg}\delta_k$ , в которую входили бы только те параметры, которые можно измерить, а не рассчитывать с помощью дополнительных методов.

Рассматриваемый диэлектрик представляет собой неупорядоченную систему, состоящую из статистической смеси компонентов, не вступающих в химическую реакцию. При решении поставленной задачи учитывалось следующее:

- эффективные диэлектрические параметры компонентов СК изменяются после спекания;
- свойства образцов используемого стекла после спекания в составе СК в присутствии частиц наполнителя отличаются от свойств отдельно спеченных образцов того же стекла;
- тангенс угла диэлектрических потерь изучаемого СК можно измерить.

В [2] было показано, что эффективный диэлектрический параметр  $D$  керамического материала сложного состава, пластических масс, компаундов с наполнителем и некоторых других материалов достаточно точно можно определить по формуле, предложенной К. Лихтенеккером и получившей название логарифмического закона смешивания:

$$\ln D = \sum_{i=1}^n y_i \ln D_i, \quad (1)$$

где  $y_i$ ,  $D_i$  — объемная доля и диэлектрический параметр  $i$ -го компонента в составе композита.

Для  $\text{tg}\delta_k$  рассматриваемого СК формула (1) принимает вид

$$\ln \text{tg}\delta_k = y_c \ln \text{tg}\delta_c + y_n \ln \text{tg}\delta_n, \quad (2)$$

где  $y_c$ ,  $y_n$  и  $\text{tg}\delta_c$ ,  $\text{tg}\delta_n$  — объемные доли и ТУДП стекла и наполнителя в составе СК соответственно.

Поскольку в формулу (2) входят параметры компонентов, которые не могут быть измерены, в соответствии с поставленной задачей ее следует трансформировать.

Для замены неизмеряемых объемных долей компонентов  $y_i$  на измеряемые массовые доли  $m_i$  воспользуемся формулой, приведенной в [3, с. 33] для  $n$ -компонентного композита:

$$y_i = \frac{m_i}{p_i} / \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{p_i}, \quad (3)$$

где  $p_i$  — плотность  $i$ -го компонента.

Воспользовавшись этой формулой, для стекла и наполнителя в составе исследуемого СК можно, соответственно, записать

$$y_c = \frac{m_c p_n}{m_c p_n + m_n p_c}; \quad (4)$$

$$y_n = \frac{m_n p_c}{m_c p_n + m_n p_c} \quad (5)$$

и тогда с учетом этого преобразовать формулу (2) к следующему виду:

$$\ln \operatorname{tg} \delta_k = \frac{m_c p_n \ln \operatorname{tg} \delta_c + m_n p_c \ln \operatorname{tg} \delta_n}{m_c p_n + m_n p_c}. \quad (6)$$

Теперь решим задачу исключения из этой формулы неизмеряемых параметров  $\operatorname{tg} \delta_c$  и  $\operatorname{tg} \delta_n$ . Поскольку их значения не зависят от состава СК, для двух образцов, изготовленных при одинаковых режимах спекания, в соответствии с формулой (2) можно записать

$$\ln \operatorname{tg} \delta_{\text{э1}} = y_{c1} \ln \operatorname{tg} \delta_c + y_{n1} \ln \operatorname{tg} \delta_n; \quad (7)$$

$$\ln \operatorname{tg} \delta_{\text{э2}} = y_{c2} \ln \operatorname{tg} \delta_c + y_{n2} \ln \operatorname{tg} \delta_n. \quad (8)$$

Решим систему этих двух уравнений относительно искоемых параметров и получим

$$\ln \operatorname{tg} \delta_c = \frac{y_{n1} \ln \operatorname{tg} \delta_{\text{э2}} - y_{n2} \ln \operatorname{tg} \delta_{\text{э1}}}{y_{n1} y_{c2} - y_{n2} y_{c1}}; \quad (9)$$

$$\ln \operatorname{tg} \delta_n = \frac{y_{c1} \ln \operatorname{tg} \delta_{\text{э2}} - y_{c2} \ln \operatorname{tg} \delta_{\text{э1}}}{y_{c1} y_{n2} - y_{c2} y_{n1}}. \quad (10)$$

Для упрощения расчетных формул выберем случай, когда  $m_{c2} = m_{n2}$ . Тогда из формул (9) и (10), с учетом (4) и (5), после ряда преобразований получим

$$\ln \operatorname{tg} \delta_c = [(p_c + p_n) m_{n1} \ln \operatorname{tg} \delta_{\text{э2}} - (m_{n1} p_c + m_{c1} p_n) \ln \operatorname{tg} \delta_{\text{э1}}] / [p(m_{n1} - m_{c1})]; \quad (11)$$

$$(12)$$

Представим эти выражения в виде

$$\ln \operatorname{tg} \delta_c = \frac{B m_{n1} - C}{p_n (m_{n1} - m_{c1})} = \frac{G_1}{p_n}; \quad (13)$$

$$\ln \operatorname{tg} \delta_n = \frac{B m_{c1} - C}{p_c (m_{c1} - m_{n1})} = \frac{G_2}{p_c}, \quad (14)$$

где  $B = (p_c + p_n) \ln \operatorname{tg} \delta_{\text{э2}}$ ;

$C = (m_{n1} p_c + m_{c1} p_n) \ln \operatorname{tg} \delta_{\text{э1}}$ ;

$G_1 = (B m_{n1} - C) / (m_{n1} - m_{c1})$ ;

$G_2 = (B m_{c1} - C) / (m_{c1} - m_{n1})$ .

В результате, из формулы (6), с учетом (13) и (14), получим выражение для расчета  $\operatorname{tg} \delta_k$  в соответствии с поставленной задачей:

$$\ln \operatorname{tg} \delta_k = \frac{m_c G_1 + m_n G_2}{m_c p_n + m_n p_c} = \frac{\frac{m_c}{m_n} G_1 + G_2}{\frac{m_c}{m_n} p_n + p_c}. \quad (15)$$

Для проверки достоверности результатов, получаемых с помощью формулы (15), были проведены измерения необходимых параметров двух образцов композитов с разными долями стекла и наполнителя, изготовленных в одинаковых технологических условиях (спекание в течение 0,5 ч при 900°C) в соответствии с [1]. При этом для соответствия условиям получения формулы для расчетов один из выбранных образцов имел в своем составе одинаковые массовые доли стекла и наполнителя ( $m_{c2} = m_{n2} = 0,5$ ). Плотность компонентов определяли с помощью пикнометра и аналитических весов, ТУДП образцов — с помощью пикнометра Е7-12 на частоте 1 МГц. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Результаты измерений параметров двух образцов СК

| Массовые доли компонентов в образцах |          |          |          | Плотность компонентов     |                           | ТУДП образцов                          |  |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|---------------------------|---------------------------|--|--|
| $m_{c1}$                             | $m_{n1}$ | $m_{c2}$ | $m_{n2}$ | $p_c$ , кг/м <sup>3</sup> | $p_n$ , кг/м <sup>3</sup> | $\operatorname{tg} \delta_{\text{э1}}$ | $\operatorname{tg} \delta_{\text{э2}}$ |
| 0,4                                  | 0,6      | 0,5      | 0,5      | $2,97 \cdot 10^3$         | $3,70 \cdot 10^3$         | 0,00015                                | 0,00027                                |

Далее с использованием этих экспериментальных данных были рассчитаны значения  $B$ ,  $C$ ,  $G_1$  и  $G_2$ , и тогда рабочая формула для прогнозирования  $\operatorname{tg} \delta_k$  приняла вид

$$\ln \operatorname{tg} \delta_k = \frac{\frac{m_c}{m_n} \cdot (-20814) - 3395}{\frac{m_c}{m_n} \cdot 3700 + 2970}. \quad (16)$$

В табл. 2 приведены результаты расчета  $\operatorname{tg} \delta_k$ , выполненного по формуле (16) в диапазоне  $m_c/m_n$  от 0,34 до 3,33 с произвольно задаваемым шагом.

Если считать, что в рассматриваемом СК плотноупакованные частицы наполнителя соответ-

Таблица 2  
Результаты  $\text{tg}\delta_k$  для разных величин  $m_c/m_n$

| $m_c/m_n$ | $\text{tg}\delta_k$ | $m_c/m_n$ | $\text{tg}\delta_k$ | $m_c/m_n$ | $\text{tg}\delta_k$ |
|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|
| 0,34      | 0,00006             | 0,56      | 0,00012             | 1,25      | 0,00037             |
| 0,37      | 0,00007             | 0,62      | 0,00014             | 1,67      | 0,00054             |
| 0,42      | 0,00008             | 0,71      | 0,00016             | 2,00      | 0,00068             |
| 0,45      | 0,00009             | 0,83      | 0,00021             | 2,50      | 0,00088             |
| 0,50      | 0,00010             | 1,00      | 0,00027             | 3,33      | 0,00116             |

ствуют реальным зернистым системам с частицами практически шаровой формы, то согласно [3, с. 13] минимальная объемная доля пространства между такими частицами составляет величину, равную 0,30. В нашем случае эта величина соответствует минимально допустимой объемной доле сплошной объемной матрицы. Согласно формуле (4) этой величине соответствует отношение  $m_c/m_n$ , равное 0,34. Сравнение результатов расчета  $\text{tg}\delta_k$  при  $m_c/m_n=1$  и  $m_c/m_n=0,71$  с экспериментальными данными табл. 1 показывает их совпадение в первом случае и хорошее согласование во втором, что также подтверждает достоверность результатов расчета при использовании полученной формулы.

\*\*\*

Таким образом, предложен простой инженерный метод прогнозирования тангенса угла диэлектрических потерь в двухкомпонентном СК без пор для широкого диапазона массовых долей компонентов. Полученная формула для вычисления  $\text{tg}\delta_k$  содержит только измеряемые параметры, причем те, что обычно используются разработчиками композиционных материалов — массовые навески и плотность компонентов, ТУДП композитов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. А. с. 1782947 СССР. Стеклокерамический материал / Л. В. Бурян, М. В. Дмитриев, В. Д. Лемза, Л. Н. Тартаковская. — 1992. — Бюл. № 47. [A. s. 1782947 SSSR. / L. V.

Buran, M. V. Dmitriev, V. D. Lemza, L. N. Tartakovskaya. 1992. Byul. N 47]

2. Дмитриев М. В. Влияние концентрации компонентов и пор на диэлектрические потери в стеклокерамике // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1998. №1. — С. 39—43. [Dmitriev M. V. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 1998. N1. P. 39]

3. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. — Ленинград: Энергия, 1974. [Dul'nev G. N., Zarichnyak Yu. P. Teploprovodnost' smesei i kompozitsionnykh materialov. Leningrad: Energiya, 1974]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 02.04 2012 г.

*Dmitriev M. V., Yerimichoy I. N., Panov L. I.*  
**Dielectric loss prediction in glass-ceramics for different correlation of mass shares of components.**

**Keywords:** glass ceramic, dielectric loss, multimeter research method, accelerated composites development.

An engineering method for predicting the dielectric loss in two-component non-porous glass ceramic has been proposed. The method allows to reduce the time and expense for conducting experiments and calculations during the design of such glass ceramic.

Ukraine, Odessa national polytechnic university.

*Дмитрієв М. В., Єримічой І. М., Панов Л. І.*  
**Прогноз діелектричних втрат у склокераміці для різних співвідношень масових часток компонентів.**

**Ключові слова:** склокераміка, діелектричні втрати, комплексний метод дослідження, прискорення розробки композитів.

Запропоновано інженерний метод прогнозування діелектричних втрат у двокомпонентній склокераміці без пор, що дозволяють скоротити термін розробки і кошти на експеримент та розрахунки.

Україна, Одеський національний політехнічний університет.

І І АУ АЕІ ЕАЕ

І І АУ АЕІ ЕАЕ



**Шарапов В. М., Полищук Е. С., Кошевой Н. Д., Ишанин Г. Г., Минаев И. Г., Совлуков А. С. Датчики. — Москва: Техносфера, 2012. — 624 с.**

В книге изложены теоретические основы, принципы действия, описаны конструкции и характеристики датчиков физических величин. Книга предназначена для научных работников, студентов, аспирантов, специалистов в области разработки датчиков, измерительных приборов, элементов и устройств вычислительной техники и систем управления.



УДК 537.311.4

С. В. НОВИЦКИЙ

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ

E-mail: serg\_nov@ukr.net

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К InP

*Экспериментально подтверждено, что температурная зависимость удельного контактного сопротивления омических контактов  $Au-TiB_2-Ge-Au-n-n^+-n^{++}-InP$  описывается моделью токопереноса с высокой плотностью дислокаций в приконтактной области полупроводника. Исследовались образцы, полученные при разных температурах отжига.*

**Ключевые слова:** фосфид индия, омический контакт, дислокации, удельное контактное сопротивление.

С повышением частот рабочего диапазона полупроводниковых микроволновых приборов и переходом в диапазон миллиметровых волн постоянно растет уровень требований к приборным структурам. В связи с этим большое внимание уделяется исследованиям фосфида индия InP, т. к. именно в этом материале дрейфовая скорость носителей заряда больше, а время междолинного перехода и коэффициент ионизации электронов меньше, чем в Si и GaAs, которые дали старт полупроводниковой СВЧ-электронике. Диоды Ганна на основе фосфида индия интенсивно разрабатываются ведущими фирмами и применяются в радиолокации, радиоспектроскопии, системах новейших телекоммуникаций, предупреждения автомобильных столкновений и многих других [1–4].

Однако преимущества фосфид-индиевых приборов могут быть нивелированы, если не уделять достаточного внимания омическим контактам к ним. Как известно, омический контакт создается дополнительным легированием приконтактной области полупроводника или сплавлением с целью понижения его сопротивления. Хороший омический контакт должен иметь линейную зависимость тока от напряжения в широких температурных и временных интервалах. Известно, что удельное сопротивление  $\rho_c$  контакта «металл–полупроводник» в зависимости от механизма токопереноса с ростом температуры  $T$  должно либо уменьшаться, либо не зависеть от температуры [5]. Однако в ряде работ в сплавных контактах к широкозонным полупроводникам с сильнодефектной приконтактной областью наблюдалась иная зависимость —  $\rho_c$  с ростом  $T$  возрастало [6, 7]. Это не согласуется ни с термоэлектронным, ни с термополевым механизмами токопрохождения, при которых удельное контактное сопротивление должно уменьшаться с ростом температуры, ни с меха-

низмом полевой эмиссии, когда удельное контактное сопротивление практически не зависит от температуры. Так, в [7] для сплавного контакта In– $n$ -GaP с большой концентрацией дислокаций в приконтактной области полупроводника возрастающая зависимость удельного контактного сопротивления от температуры, по предположению авторов, обусловлена металлическими шунтами, которые представляют собой атомы индия, локализованные на дислокациях, пересекающих область объемного заряда. Однако сопротивление металла при температурах, превышающих температуру Дебая, должно линейно возрастать, а этого в эксперименте не наблюдалось. В [8] подобные результаты объяснялись ограничением протекающего тока диффузионным подводом электронов в полупроводнике с  $n-n^+$ -переходом, при этом предполагалось, что  $\rho_c \sim T^2$ .

В [9] при определении причин роста  $\rho_c$  с увеличением температуры в контакте  $Au-Ti-Pd_2Si-n^+Si$  учитывается прохождение тока через металлические шунты, которые пронизывают дислокации, и ограничение протекающего тока диффузионным подводом. Принципиальным отличием [9] от других теорий является предположение о протекании тока через участки, обогащенные, а не обедненные электронами, обуславливающие формирование потенциальной ямы, а не барьера.

В настоящей работе предложенный в [9] подход применен для исследования температурной зависимости удельного контактного сопротивления омического контакта к фосфид-индиевой эпитаксиальной  $n-n^+-n^{++}$ -структуре.

Экспериментальные образцы  $Au-TiB_2-Ge-Au-n-n^+-n^{++}-InP$  были получены последовательным магнетронным распылением слоев контактной металлизации на предварительно очищенную фотонной обработкой поверхность эпитаксиальной пленки  $n-InP$  с концентрацией до-



норов  $n=9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , толщиной  $n$ -слоя около 2 мкм. Толщина  $n^+$ -слоя составляла примерно 3 мкм, концентрация донорной примеси в нем — около  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , толщина  $n^{++}$ -подложки InP примерно 350 мкм, концентрация донорной примеси в ней — около  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Толщина слоев контактной металлизации: Au — 1800 Å, Ge — 400 Å, TiB<sub>2</sub> — 1000 Å, Au — 2000 Å. Омические контакты формировались в процессе быстрой термической обработки при температурах 410, 435, 450 и 460°C (время отжига 30 с). Зависимость удельного контактного сопротивления от температуры исследовали методом TLM в интервале 100–380 К.

Согласно модели, предложенной в [9–11], в торце каждой дислокации, заполненной металлом и «проросшей» в полупроводник, образуется слой Шоттки. Между ним и поверхностными состояниями возникает контактная разность потенциалов, которая порождает электрическое поле. По причине кривизны металлических шунтов и их малых размеров напряженность электрического поля достаточно высока. Силы зеркального изображения, действующие на электроны, и краевой эффект приводят к значительному росту напряженности электрического поля и, соответственно, к понижению потенциально-го барьера на величину

$$\Delta\varphi = q\sqrt{Z}/(4\pi\epsilon_0\epsilon_s r),$$

где  $q$  — заряд электрона;

$Z$  — количество электронов возле торца дислокации;

$\epsilon_0, \epsilon_s$  — диэлектрическая проницаемость, соответственно, вакуума и полупроводника;

$r$  — радиус металлического шунта.

Термоэлектронный ток, возникающий при этом, ограничивается диффузионным подводом электронов ( $V_T e^{y_{c0}} L_D / (4D_n) \gg 1$ ) и уменьшается с ростом температуры. Как следствие, возрастает контактное сопротивление  $R_{c0}$ , которое в случае невырожденного полупроводника, когда ток течет через контакт «металл — полупроводник» в месте выхода дислокации, определяется по формуле [9]

$$R_{c0} = \frac{kT}{q} \left( 1 + \frac{0,6V_T}{4D_n} e^{y_{c0}} L_D \right) / \left( \frac{qV_T}{4} N_d e^{y_{c0}} \right),$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;

$V_T$  — средняя тепловая скорость электронов;

$D_n$  — коэффициент диффузии электронов;

$y_{c0}$  — равновесный безразмерный потенциал на границе раздела «металл — полупроводник»,  $y_{c0} = q\varphi_{c0} / (kT)$ ;

$\varphi_{c0}$  — контактный потенциал;

$L_D$  — дебаевская длина экранирования;

$N_d$  — концентрация доноров в полупроводнике.

Величину контактного сопротивления  $R_{diff}$ , определяемого механизмом диффузионного под-

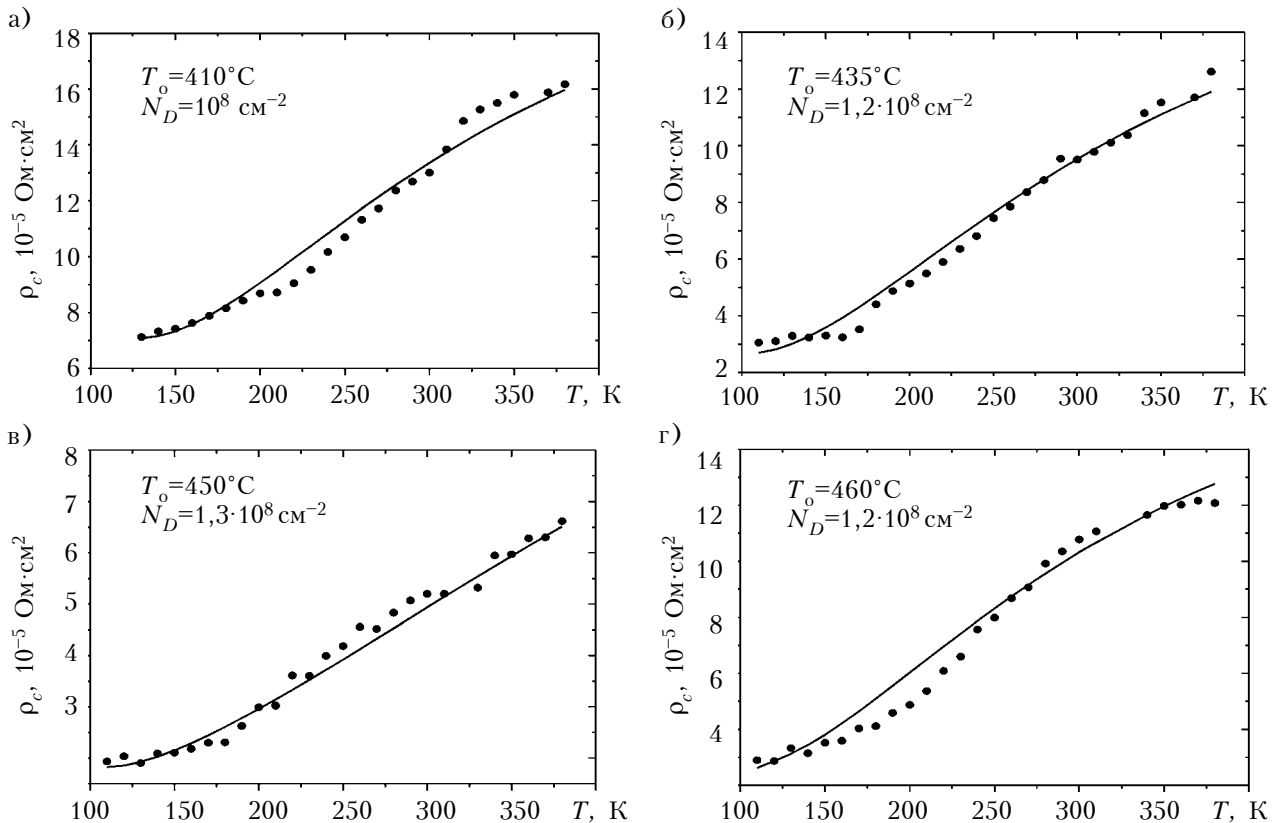


Рис. 1. Температурные зависимости  $\rho_c$  исследуемых структур после отжига при различных температурах  $T_0$ , имеющих различную плотность проводящих дислокаций  $N_D$  (точки — эксперимент; линия — расчет)

вода, для контакта единичной площади находилась по формуле [11]

$$R_{diff} = \frac{R_{c0}}{\pi L_D^2 N_D},$$

где  $N_D$  — концентрация проводящих дислокаций.

Полное сопротивление контакта  $R_c$  будет определяться последовательно включенными сопротивлениями  $R_{diff}$  и  $R_{sh}$ :

$$R_c = R_{diff} + R_{sh},$$

где  $R_{sh}$  — сопротивление металлических шунтов,

$$R_{sh} = \rho_0(1 + \alpha T) d_p / (\pi r^2 N_D);$$

$\rho_0$  — удельное сопротивление металла при  $T = 0^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  — температурный коэффициент электрического сопротивления металла;

$d_p$  — расстояние которое электроны проходят по дислокации из объема полупроводника до сплошного металлического контакта.

На рис. 1, где показаны температурные зависимости удельного контактного сопротивления после отжига, видно, что экспериментальные результаты достаточно хорошо описываются теоретической моделью формирования контактного сопротивления в полупроводниках с большой плотностью дислокаций, предложенной в [9–11]. Наименьшее удельное контактное сопротивление ( $\rho_c = 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ ) имеет образец, прошедший термическую обработку при  $450^\circ\text{C}$ .

\*\*\*

Таким образом, экспериментальные температурные зависимости удельного контактного сопротивления омических контактов  $\text{AuGe}-\text{TiB}_2-\text{Au}$  к  $\text{InP}$  находятся в соответствии с рассчитанными по модели токопереноса в омических контактах с высокой плотностью дислокаций в приконтактной области полупроводника. Такая модель позволяет определить температуру формирования омического контакта «металл — полупроводник», при которой удельное контактное сопротивление будет наименьшим. Полученные результаты можно использовать для оптимизации конструкции микроволновых приборов из  $\text{InP}$  в миллиметровом диапазоне длин волн.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Eisele H., Kamoua R. Sub millimeter-wave InP Gunn devices // IEEE MTT. — 2004. — Vol. 52, N 10. — P. 2371–2378.
2. Eisele H., Rydberg A., Haddad G. I. Recent advances in the performance of InP Gunn devices and GaAs TUNNETT diodes for the 100-300-GHz frequency range and above // IEEE MTT. — 2000. — Vol. 48, N 4. — P. 626–631.
3. Eisele H., Naftaly M., Kamoua R. Generation of submillimeter-wave radiation with GaAs TUNNETT diodes and InP Gunn devices in a second or higher harmonic mode // IJMW. — 2005. — Vol. 26, N 1. — P. 1–14.
4. Okazaki H., Sato T., Yoshizawa N., Hashizume T. Optical and electrical properties of InP porous structures formed on *p-n* substrates // Proc. of 22<sup>nd</sup> 2010 Internat. Confer. «IPRM-2010». — Japan Kagawa. — 2010. — P. 77–80.
5. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of semiconductor devices. — A. John Wiley & Sons, Inc. Publ., 2007.

6. Blank T. V., Gol'dberg Yu. A. Mechanisms of current flow in metal–semiconductor ohmic contacts (review) // Semiconductors. — 2007. — Vol. 41, N 11. — P. 1263–1292.

7. Бланк Т. В., Гольдберг Ю. А., Константинов О. В. и др. Особенности механизма протекания тока в омическом контакте к  $\text{GaP}$  // Письма в ЖТФ. — 2004. — Т. 30, № 19. — С. 17–24. [Blank T. V., Gol'dberg Yu. A., Konstantinov O. V. i dr. // Pis'ma v ZhTF. 2004. Vol. 30, N 19. P. 17]

8. Clausen T., Leistiko O., Chorkendorff I., Larsen J. Transport properties of low-resistance ohmic contacts to  $\text{InP}$  // Thin Solid Films. — 1993. — Vol. 232. — P. 215–227.

9. Belyaev A. E., Boltovets N. S., Konakova R. V. et al. Temperature dependence of contact resistance of  $\text{Au-Ti-Pd}_2\text{Si-n}^+-\text{Si}$  ohmic contacts // SPQEO. — 2010. — Vol. 13, N 4. — P. 436–438.

10. Саченко А. В., Беляев А. Е., Болтовец Н. С. и др. Механизмы токопереноса в омическом контакте к  $\text{GaN}$  и другим соединениям  $\text{A}^3\text{B}^5$  с высокой плотностью дислокаций // Матер. 8-й Всероссийской конфер. «Нитрид галлия, индия и алюминия — структуры и приборы». — Россия, г. Санкт-Петербург. — 2011. — С. 229–230. [Sachenko A. V., Belyaev A. E., Boltovets N. S. i dr. Mekhanizmy tokoperenosa v omicheskoi kontakte k  $\text{GaN}$  i drugim soedineniyam  $\text{A}^3\text{B}^5$  s vysokoi plotnost'yu dislokatsii // Mater. 8-i Vserossiiskoi konfer. «Nitrid galliya, indiya i alyuminiya — struktury i pribory». Rossiya, St-Petersburg, 2011. P. 229]

11. Sachenko A. V., Belyaev A. E., Bobyl A. V. Temperature dependence of the contact resistance of ohmic contacts to III–V compounds with a high dislocation density // Semiconductors. — 2012. — Vol. 46, N 3. — P. 334–341.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 28.02 2012 г.

Novitskyi S. V. **Effect of annealing temperature on the value of contact resistance of ohmic contacts to InP.**

*Keywords: indium phosphide, ohmic contact, dislocation, the specific contact resistance.*

It is experimentally confirmed that the temperature dependence of specific contact resistance of ohmic contacts  $\text{Au}-\text{TiB}_2-\text{Ge}-\text{Au}-n-n^+-n^{++}-\text{InP}$  is described with the current transport model with a high density of dislocations in the contact region of the semiconductor. The samples used in the experiment were obtained at different annealing temperatures.

Ukraine, Kyiv, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine.

Новицький С. В. **Дослідження температурної залежності контактного опору омичних контактів до InP.**

*Ключові слова: фосфід індію, омичний контакт, дислокації, питомий контактний опір.*

Експериментально підтверджено, що температурна залежність питомого контактного опору омичних контактів  $\text{Au}-\text{TiB}_2-\text{Ge}-\text{Au}-n-n^+-n^{++}-\text{InP}$  описується моделлю струмопереносу з високою щільністю дислокацій у приконтактній ділянці напівпровідника. Досліджувались зразки, отримані при різних температурах відпалу.

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ.

УДК 621.38.049.77

Д. ф.-м. н. А. А. СЕМЕНОВ, д. ф.-м. н. Д. А. УСАНОВ, А. А. КОЛОКИН

Россия, Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского  
SemenovAA@info.sgu.ru

## ИНДУКТИВНОСТЬ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ПЕРЕСТРАИВАЕМАЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРОЙ

*Предложена теоретическая модель плоской пассивной катушки индуктивности с электронным управлением. Приведены расчетные графики зависимости добротности и индуктивности колебательного контура от напряжения прямого смещения  $n-i-p-i-n$ -структуры, используемой в качестве специфического сердечника, свойства которого изменяются под воздействием приложенного электрического поля. Сравнение расчетных значений с экспериментальными показало их хорошее соответствие друг другу.*

**Ключевые слова:** электрически перестраиваемая индуктивность,  $n-i-p-i-n$ -структура, регулируемый электрическим полем сердечник.

Электрически управляемая полупроводниковая емкость является распространенным элементом микроэлектронных устройств [1]. В то же время проблема изменения параметров индуктивности под воздействием приложенного электрического поля окончательно не решена. Специфика применения катушек индуктивности в современных электронных приборах с высокой степенью интеграции заключается в том, что они плохо поддаются как миниатюризации, так и реализации в интегральном исполнении, а изменять величину их индуктивности можно преимущественно способом механической перестройки.

Экспериментально возможность реализации катушки индуктивности, регулируемой электрическим полем, была показана нами в [2–4]. Предлагаемый способ электронного управления индуктивностью плоской пассивной катушки заключался во введении в ее конструкцию специфического сердечника — его свойства изменяются под воздействием приложенного электрического поля, оказывая при этом влияние на величину индуктивности. В качестве такого сердечника использовалась кремниевая структура  $n-i-p-i-n$ -типа, обладающая протяженными  $i$ -областями, проводимость которых изменяется в широком диапазоне в зависимости от величины приложенного к структуре напряжения смещения.

Анализ изменения индуктивности такой системы под влиянием введенного в ее состав объекта с неоднородной структурой и параметрами, изменяющимися под воздействием внешнего смещения, чрезвычайно сложен [5, с. 186–189].

В общем случае на величину индуктивности оказывают влияние физические характеристики материала, используемого в качестве сердечника, — электрические и магнитные свойства,

определяемые его составом и структурой (электропроводность, магнитная проницаемость), геометрические размеры сердечника, наличие в нем неоднородностей [5; 6, с. 293–294].

В настоящей работе рассматривается теоретическая модель плоской пассивной катушки с электрическим управлением.

Предложен следующий механизм взаимодействия катушки индуктивности с полупроводниковой структурой  $n-i-p-i-n$ -типа. При введении в индуктивный элемент  $n-i-p-i-n$ -структуры без смещения в него, по сути, вносятся отрезки полупроводника собственной проводимости ( $i$ -области) с областями неоднородной проводимости (участки  $p$ -,  $n$ -типа и переходов) и небольшими участками диамagnetика (контакты из меди или золота). Введение в катушку диамagnetиков (материалов с магнитной проницаемостью  $\mu < 1$ ) и материалов, содержащих свободные носители заряда, должно привести к уменьшению ее индуктивности и к снижению добротности, поскольку при изменении концентрации носителей заряда в базе в сердечнике образуются вихревые токи, представляющие собой элементарные катушки индуктивности. Магнитное поле вихревых токов противодействует возбуждавшему их магнитному полю катушки, что в совокупности можно рассматривать как возникновение некоторой эквивалентной индуктивности, взаимодействующей с исходной и включенной параллельно высокоомной  $n-i-p-i-n$ -структуре без смещения.

Таким образом,  $n-i-p-i-n$ -структуру, помещенную в объеме катушки индуктивности, можно представить в виде комплексного сопротивления  $Z$  (характеризующего импеданс полупроводниковой структуры по отношению к вихревым токам), индуктивно связанного через эле-

мент связи  $L$  с колебательным контуром, образованным индуктивностью  $L_0$  и сопротивлением потерь контура  $R_0$  и емкостью  $C$ , подключенной параллельно  $L_0$ .

Вихревые токи в  $n-i-p-i-n$ -структуре создают магнитное поле, которое изменяет первичное магнитное поле  $H_0$  в объеме катушки индуктивности  $L_0$ . Взаимодействие этих токов с первичным магнитным полем катушки  $L_0$  определяется коэффициентом связи  $M$ .

Эквивалентная схема колебательного контура, в индуктивном элементе которого размещена кремниевая структура  $n-i-p-i-n$ -типа с протяженными  $i$ -областями, представлена на рис. 1.

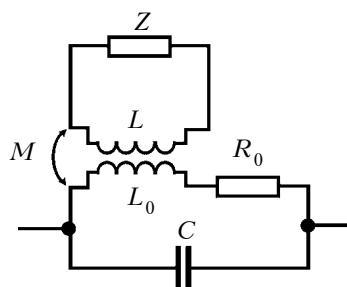


Рис. 1. Эквивалентная схема колебательного контура с кремниевой структурой  $n-i-p-i-n$ -типа в объеме катушки

При включении напряжения прямого смещения в  $n-i-p-i-n$ -структуре происходит обогащение  $i$ -областей носителями заряда, что, с одной стороны, приводит к увеличению количества элементарных индуктивностей, образуемых вихревыми токами, а с другой — увеличивает шунтирующее влияние самой  $n-i-p-i-n$ -структуры на величину совокупной индуктивности вихревых токов.

Следует также отметить, что при прямом смещении в  $n-i-p-i-n$ -структуре существует собственный ток, образованный направленным дрейфом в поле носителей заряда. Участие этих зарядов в образовании вихревых токов должно привести к образованию спиральных траекторий, что эквивалентно увеличению расстояния между «витками» совокупной индуктивности вихревых токов и, следовательно, к уменьшению ее величины.

Таким образом, внесение в индуктивный элемент  $n-i-p-i-n$ -структуры и изменение концентрации носителей заряда в ее высокоомных областях будет приводить к изменению исходной величины индуктивности.

Влияние  $n-i-p-i-n$ -структуры без смещения на параметры колебательного контура можно приблизительно представить на основе экспериментальных данных [2–4] в виде эквивалентного изменения этих параметров:

$$L'_0 = L_0 - N\Delta L; R'_0 = R_0 + K\Delta R,$$

где  $\Delta L, \Delta R$  — изменение величины индуктивности и сопротивления потерь контура соответственно;

$N, K$  — коэффициенты пропорциональности, отражающие степень влияния коэффициента связи  $M$  на  $L_0$  и  $R_0$  соответственно.

Это позволяет приблизительно представить колебательный контур, в состав которого входит  $n-i-p-i-n$ -структура (рис. 1), в виде эквивалентной схемы, изображенной на рис. 2, а. Уменьшение индуктивности отражено здесь противофазным подключением  $\Delta L$ , параллельно которой включено сопротивление  $n-i-p-i-n$ -структуры  $r$ , значение которого при отсутствии смещения велико.

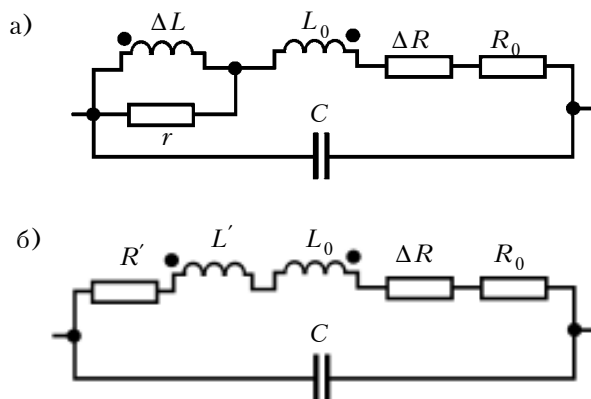


Рис. 2. Эквивалентные схемы колебательного контура с учетом влияния  $n-i-p-i-n$ -структуры

При подаче на  $p-i-n$ -диоды напряжения прямого смещения происходит процесс инжекции носителей заряда в высокоомные  $i$ -области диода (базы), в результате чего концентрация носителей заряда в базе возрастает на несколько порядков и, соответственно, увеличивается проводимость базы [7, 8]. Сопротивление  $r$  уменьшается, а величина вихревых токов при этом также изменяется, что и отражается на результирующем магнитном поле индуктивности  $L'_0$ .

Для теоретического анализа влияния  $n-i-p-i-n$ -структуры на параметры индуктивного элемента, в состав которого она входит, эквивалентная схема контура была преобразована к виду, приведенному на рис. 2, б, где вместо элементов контура  $\Delta L$  и  $r$ , включенных в исходной схеме параллельно, имеется последовательное соединение  $L'$  и  $R'$ .

Исходя из выражения для полного сопротивления  $Z = \alpha + j\beta$ , где  $\alpha = \text{Re}Z$ , а  $\beta = \text{Im}Z$ , для последовательно соединенных сопротивления  $R'$  и индуктивности  $L'$  по схеме на рис. 2, б, справедливы соотношения

$$R' = \frac{\omega^2 \Delta L^2 r}{r^2 + (\omega \Delta L)^2}; L' = \frac{X'_{L'}}{\omega} = \frac{\Delta L r^2}{r^2 + (\omega \Delta L)^2},$$

где  $L', R'$  — соответственно, эквивалентные индуктивность и сопротивление потерь, вносимые  $\Delta L$  и  $r$  (см. рис. 2, а);

$\omega$  — круговая частота;

$X'_{L'}$  — индуктивное сопротивление.

С учетом этих соотношений запишем выражения для совокупной индуктивности контура, в состав которого входит индуктивный элемент

с управляемой электрическим полем  $n-i-p-i-n$ -структурой

$$L'_0 = L_0 - N'L', \quad (1)$$

и для полного сопротивления потерь

$$R'_0 = R_0 + \Delta R + K'R', \quad (2)$$

определяющего добротность индуктивного элемента. (Здесь  $N'$  и  $K'$  — безразмерные коэффициенты пропорциональности.)

Сопротивление  $i$ -слоя  $p-i-n$ -структуры в режиме прямого тока хорошо описывается выражением [8]

$$R_i = \omega^2 / (2\mu\tau I_0),$$

где  $\omega$  — толщина  $i$ -слоя;

$\mu$  — подвижность носителей заряда;

$\tau$  — время жизни носителей заряда;

$I_0$  — величина прямого тока через структуру.

Для диодов с толстой базой, предназначенных для коммутации СВЧ-колебаний с большим уровнем мощности, время жизни обычно составляет около  $5 \cdot 10^{-6}$  с [8].

Для колебательного контура, в состав которого входят параллельно соединенные  $C$  и  $L'_0$ , а также сопротивление потерь  $R'_0$ , включенное последовательно с индуктивностью  $L'_0$ , справедливо следующее равенство, определяющее добротность контура:

$$Q = \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{L'_0}{C}}. \quad (3)$$

Формулы (1)–(3) аппроксимируют экспериментальные зависимости [3–5] с точностью до констант, значения которых определяются экспериментально в каждом отдельном случае. С учетом констант формулы приобретают следующий вид:

$$L'_0 = L_0 + N'L' - L_C; \quad (4)$$

$$Q = P \left( \frac{1}{R_0 + \Delta R + K'R'} \sqrt{\frac{L'_0}{C}} \right) - Q_C, \quad (5)$$

где  $L_C$  и  $Q_C$  — эмпирически найденные константы;  
 $P$  — коэффициент пропорциональности.

Для расчетов значения тока и падения напряжения измерялись непосредственно на диодах  $n-i-p-i-n$ -структуры, остальные параметры имели следующие значения:

$$\begin{aligned} L_0 &= 1,24 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}; & R_0 + \Delta R &= 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}; \\ \Delta L &= 2 \cdot 10^{-10} \text{ Гн}; & C &= 25,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}; \\ L_C &= 1,27 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}; & Q_C &= 70,2; & \omega &= 565,5 \cdot 10^6; \\ N' &= 8,6; & K' &= 1,1; & P &= 1,85. \end{aligned}$$

Полученные расчетные зависимости добротности и индуктивности колебательного контура (см. рис. 1) от напряжения прямого смещения  $n-i-p-i-n$ -структуры представлены на **рис. 3**, где видно хорошее количественное и ка-

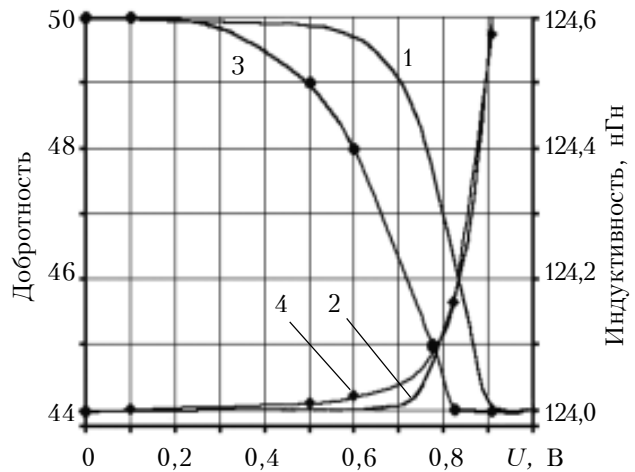


Рис. 3. Расчетные (1, 2) и экспериментальные (3, 4) зависимости добротности (1, 3) и индуктивности (2, 4) колебательного контура от напряжения прямого смещения  $n-i-p-i-n$ -структуры

чественное соответствие предложенной теоретической модели экспериментальным данным.

\*\*\*

Таким образом, проведенные исследования показали, что катушка, выполненная на сердечнике, который является  $n-i-p-i-n$ -структурой с толстой базой, представляет собой индуктивный элемент, обладающий способностью к перестройке под воздействием потенциала, приложенного к выводам  $n-i-p-i-n$ -структуры. Разработанная модель, описывающая поведение такого элемента, позволяет проводить анализ электронных цепей, содержащих катушку индуктивности предложенной конструкции, с достаточной для инженерного расчета точностью.

Перестраиваемые электрическим полем катушки индуктивности удобны для изготовления в планарных интегральных схемах, когда витки формируются напылением или травлением материала поверхности вокруг  $p-i-n$ -структуры, расположенной в объеме катушки.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Берман Л. С. Нелинейная полупроводниковая емкость. — Москва: Физматгиз, 1963. [Berman L. S. Nelineinaya poluprovodnikovaya emkost'. Moskva. Fizmatgiz, 1963]
2. Семенов А. А., Усанов Д. А. Индуктивность, перестраиваемая электрическим полем // Изв. ВУЗов. Электроника. — 2009. — № 4(78). — С. 34–40. [Semenov A. A., Usanov D. A. // Izv. VUZov. Elektronika. 2009. N 4(78). P. 34]
3. Семенов А. А., Усанов Д. А. Индуктивность, перестраиваемая электрическим полем // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 5. — С. 3–9. [Semenov A. A., Usanov D. A. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2009. N 5. P. 3]
4. Пат. 2384910 РФ. Катушка индуктивности, перестраиваемая электрическим полем / А. А. Семенов, Д. А. Усанов. — 2010. — Бюл. № 8. [Pat. 2384910 RF. / A. A. Semenov, D. A. Usanov. 2010. Bull. 8]
5. Баранов В. М., Карасевич А. М., Сарычев Г. А. Испытания и контроль качества материалов и конструкций. —



Москва: Высшая школа, 2004. [Baranov V. M., Karasevich A. M., Sarychev G. A. Ispytaniya i kontrol' kachestva materialov i konstruktсии. Moskva. Vysshaya shkola, 2004]

6. Баранов В. М., Карасевич А. М., Сарычев Г. А. Диагностика материалов и конструкций. — Москва: Высшая школа, 2007. [Baranov V. M., Karasevich A. M., Sarychev G. A. Diagnostika materialov i konstruktсии. Moskva. Vysshaya shkola, 2007]

7. Дзехпер Г. Б., Орлов О. С.  $P-i-n$ -диоды в широкополосных устройствах СВЧ. — Москва: Сов. радио, 1970. [Dzekhtser G. B., Orlov O. S.  $P-i-n$ -diody v shirokopolosnykh ustroystvakh SVCh. Moskva. Sov. radio, 1970]

8. Вайсблат А. В. Коммутационные устройства на полупроводниковых диодах. — Москва: Радио и связь. 1987. [Vaisblat A. V. Kommutatsionnye ustroystva na poluprovodnikovyykh diodakh. Moskva. Radio i svyaz'. 1987].

Дата поступления рукописи  
в редакцию 12.03 2012 г.

Semenov A. A., Usanov D. A., Kolokin A. A. **Inductance, electrically adjusted by semiconductor structure.**

*Keywords: electrically controlled inductance,  $n-i-p-i-n$ -structure, electric field-adjusted core.*

A theoretical model of a passive flat inductor with electronic control is offered. Design charts of tank inductance and Q factor dependence on the forward bias voltage of  $n-i-p-i-n$ -structure, used as a

specific core, the characteristics of which are regulated under the influence of an applied electric field, are presented. The comparison of design values with experimental features has shown their good correspondence with each other.

Russia, Saratov, Saratov State University by N. G. Chernyshevskij.

Семенов А. А., Усанов Д. О., Колокин О. А. **Индуктивность, что электрично перестроюється напівпровідниковою структурою.**

*Ключові слова: електрично перенастроювана індуктивність,  $n-i-p-i-n$ -структура, регульоване електричним полем осердя.*

Запропоновано теоретичну модель плоскої пасивної котушки індуктивності з електронним управлінням. Наведено розрахункові графіки залежності добротності та індуктивності коливального контуру від напруги прямого зміщення  $n-i-p-i-n$ -структури, що використовується як специфічне осердя, властивості якого змінюються під дією прикладеного електричного поля. Порівняння розрахованих значень з експериментальними показало їх добру відповідність одне одному.

Росія, Саратовський державний університет ім. М. Г. Чернишевського.

І І АУ А ЕІ ЕАЕ

І І АУ А ЕІ ЕАЕ



Белоус А. И., Емельянов В. А., Турцевич А. С. **Основы схемотехники микроэлектронных устройств.— Москва: Техносфера, 2012.— 472 с.**

В книге представлен анализ особенностей работы, методы проектирования и основы практического применения цифровых микросхем в составе современных микроэлектронных устройств, предложен большой набор эффективных схемотехнических решений базовых элементов для реализации требований, предъявляемых к микроэлектронным устройствам, приведено детальное описание принципов работы и правил применения современных базовых элементов в составе микроэлектронных устройств. Издание ориентировано на широкий круг инженерно-технических работников, ученых, студентов и аспирантов, специализирующихся в области разработки, организации производства и эксплуатации радиоэлектронной бытовой, промышленной и специальной техники, информационно-коммуникационных, телекоммуникационных и навигационных применений, использующих современные микроэлектронные устройства.



УДК 621.3.049.77: 681.325

К. т. н. В. П. СИДОРЕНКО, д. т. н. В. Г. ВЕРБИЦКИЙ, Ю. В. ПРОКОФЬЕВ

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов НАНУ  
E-mail: sidorenko@imd.org.ua

## СХЕМОТЕХНИКА СБИС ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА МАТЕРИАЛОВ

*Разработана, изготовлена и испытана СБИС, позволяющая в составе микроэлектронного координатно-чувствительного детектора проводить одновременный анализ всего элементного состава материала. Схема обеспечивает срабатывание усилителя-преобразователя при поступлении на его вход отрицательного заряда величиной  $1,6 \cdot 10^{-13}$  Кл. Быстродействие микросхемы в режиме счета составляет не менее 3 МГц, в режиме считывания информации со счетчиков — более 4 МГц, ток потребления — не более 7 мА.*

**Ключевые слова:** СБИС, КМОП-технология, микроэлектронный координатно-чувствительный детектор, элементный анализ, усилители-преобразователи, 10-разрядные счетчики.

В настоящей работе рассмотрены вопросы схемотехнической реализации СБИС УБ5709ИК01-2.11 [1]. В составе микроэлектронного координатно-чувствительного детектора (МКЧД) [2] разработанная СБИС обеспечивает одновременное детектирование разделенного в пространстве спектра ионов, принимая и обрабатывая информацию об интенсивности потоков частиц различной массы.

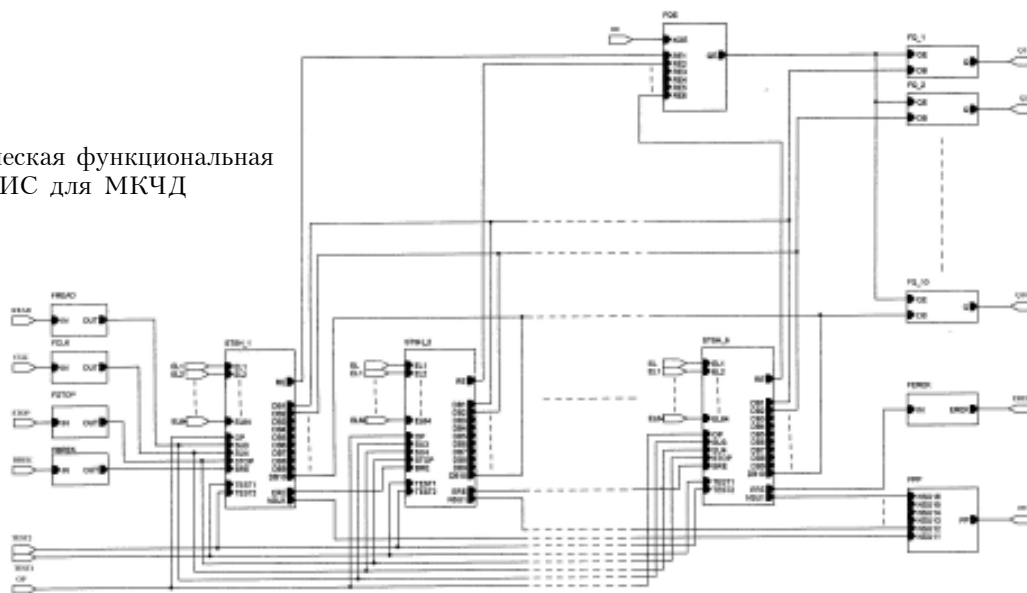
В составе МКЧД СБИС используется вместе с умножителем электронов, выполненном в виде двух микроканальных пластин (МКП) в шевронной сборке и обеспечивающим коэффициент умножения электронов не менее  $10^6$ , т. е. каждый ион на входе МКП обеспечивает попадание на соответствующий входной электрод СБИС  $10^6$

электронов, сообщая ему отрицательный заряд, равный  $1,6 \cdot 10^{-13}$  Кл, который должен обеспечить срабатывание подключенного к нему входного усилителя-преобразователя «заряд — импульс».

СБИС выполнена по КМОП-технологии и содержит 143489 элементов, в том числе 142322 МОП-транзистора, размещенных на кристалле размером  $10,05 \times 10,2$  мм.

На **рис. 1** приведена электрическая функциональная схема СБИС. Микросхема содержит 384 канала приема и обработки информации, конструктивно выполненных в виде шести блоков STSH\_1...STSH\_6 по 64 канала в каждом (**рис. 2**). Каждый канал включает входной электрод EL1...EL64 для приема заряда, входной

Рис. 1. Электрическая функциональная схема СБИС для МКЧД



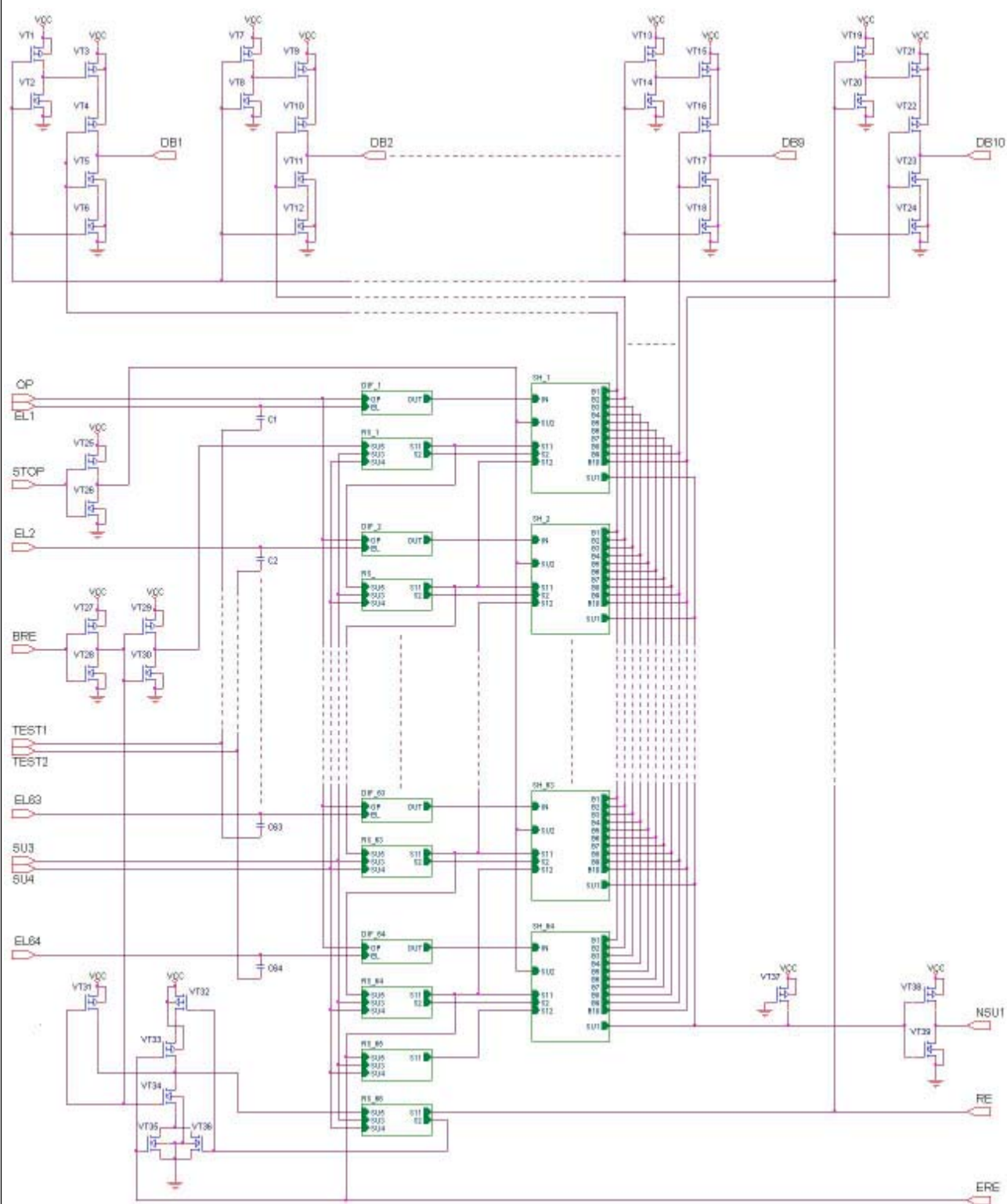


Рис. 2.  
Электрическая функциональная схема блока счетчиков

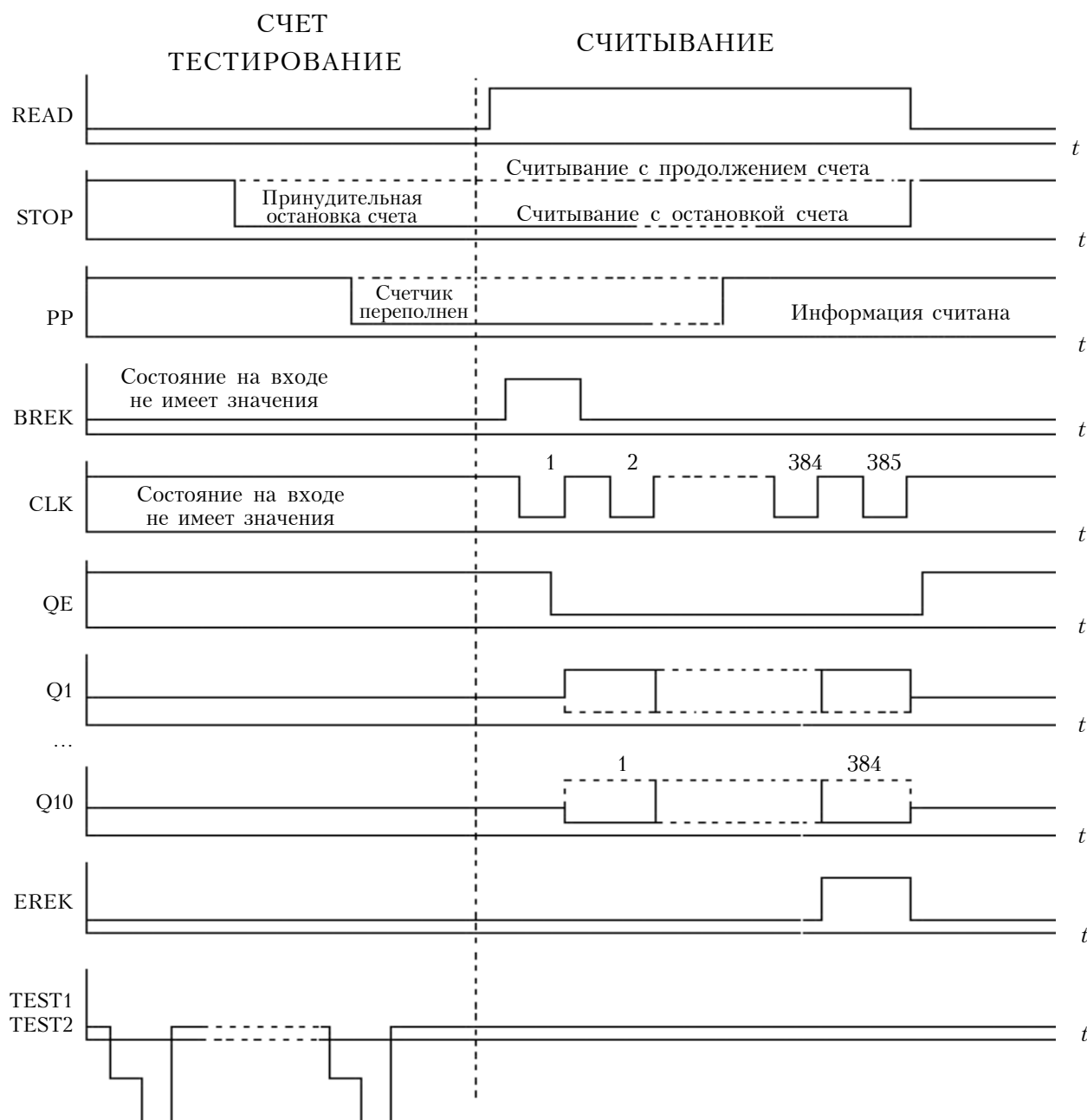


Рис. 3. Временная диаграмма работы СБИС

усилитель-преобразователь DIF\_1...DIF\_64 и 10-разрядный счетчик импульсов SH\_1...SH\_64. Микросхема также содержит усилители-формирователи входных и выходных сигналов FREAD, FCLK, FSTOP, FBREK, FQE, FQ1...FQ10, FERЕК, FPP (рис. 1) и схемы управления режимами работы микросхемы, которые обеспечивают счет импульсов счетчиками, считывание информации со счетчиков, обнуление счетчиков, включение и выключение выходных усилителей, работу в тестовом режиме.

Временная диаграмма работы микросхемы в режимах «Счет», «Считывание» и «Тестирование» показана на рис. 3.

### Входные усилители-преобразователи

На рис. 4 приведена электрическая принципиальная схема входного усилителя-преобразователя DIF, который обеспечивает преобразование «заряд — импульс». Использование такой схемы является отличительной чертой запатентованного МКЧД [2].

В исходном состоянии напряжения на входах усилителя-преобразователя EL, т. е. на затворах транзисторов VT6 и VT7, одинаковы за счет обратной связи через транзисторы VT1, VT2 и равны напряжению  $U_{OP}$  на входе OP. Поскольку затвор транзистора VT8 соединен со стоком, он всегда находится в насыщении. Затвор

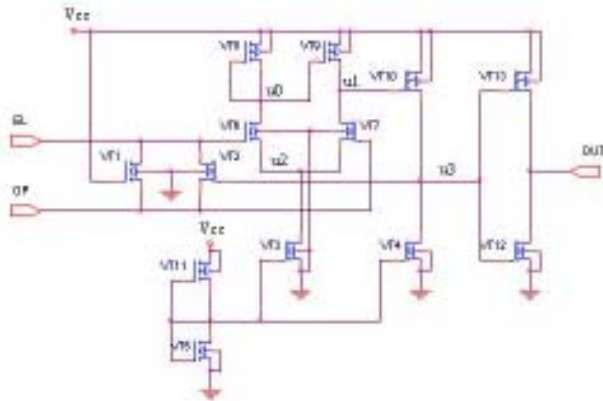


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема входного усилителя-преобразователя «заряд — импульс»

и исток транзистора VT8 соединены, соответственно, соответственно, с затвором и истоком транзистора VT9, поэтому когда транзистор VT9 находится в насыщении, он работает в режиме «токового зеркала» транзистора VT8. Так как истоки транзисторов VT6 и VT7 соединены, а на их затворах в исходном состоянии потенциалы одинаковы, они имеют одинаковое управляющее напряжение, равное разности потенциалов затворов и истоков этих транзисторов ( $U_3 - U_{и}$ ). Длина каналов этих транзисторов одинакова (минимальная)  $L_6 = L_7$ , а поскольку ширина канала  $W_6$  транзистора VT6 больше ширины канала  $W_7$  транзистора VT7, то и ток  $I_6$ , протекающий через транзистор VT6, больше тока  $I_7$  транзистора VT7. Токи в транзисторах VT9 и VT8 равны, соответственно, токам транзисторов VT6 и VT7, а т. к. транзисторы VT8 и VT9 конструктивно одинаковы и транзистор VT8 находится в насыщении, транзистор VT9 в этом случае будет находиться в триодной области и иметь низкое напряжение сток — исток  $U_{си}$ . Следовательно, напряжение в узле u1 будет иметь значение, близкое к напряжению питания  $V_{cc}$  (+5 В), транзистор VT10 будет закрыт и в узле u3 будет напряжение, близкое к нулю. При этом выходной транзистор VT12 усилителя-преобразователя будет закрыт, а VT13 — открыт, а выходной вывод усилителя-преобразователя OUT через транзистор VT13 будет подключен к шине питания  $V_{cc}$ . Поэтому в исходном состоянии на выходе усилителя-преобразователя устанавливается напряжение высокого уровня, близкое к напряжению питания  $V_{cc}$ .

Схема должна обеспечить срабатывание усилителя-преобразователя и формирование одиночного импульса при поступлении на его вход ЕЛ отрицательного заряда  $\Delta Q_{\text{вх}} \geq |-1,6 \cdot 10^{-13}|$  Кл, вызывающего на входе отрицательный перепад напряжения

$$\Delta U_{\text{BX}} \geq \Delta Q_{\text{BX}} / C_{\text{BX}},$$

где  $C_{BX}$  — емкость входного узла EL.

Поскольку транзистор VT9 имеет максимальный ток в насыщении, работая при этом в режиме «токового зеркала» транзистора VT8, его максимальная величина определяется током в цепи

транзисторов VT6 и VT8, который зависит от напряжения на затворе транзистора VT6. При поступлении на входной электрод EL, к которому подключен затвор транзистора VT6, отрицательного заряда  $\Delta Q_{\text{вх}}$  ток в цепи транзисторов VT6 и VT8 уменьшается.

Для переключения схемы необходимо, чтобы ток насыщения  $I_7$  транзистора VT7 превысил ток насыщения  $I_6$  транзистора VT6 [3]. При этом ток  $I_7$  транзистора VT7 станет больше тока  $I_9$  транзистора VT9 и начнется разряд узла u1, который будет продолжаться до тех пор, пока транзистор VT7 не выйдет из насыщения и токи  $I_7$  и  $I_9$  не сравняются.

При этом в узле u1 устанавливается низкий потенциал, что обеспечивает высокое отпирающее напряжение транзистора VT10 и приводит к повышению потенциала в узле u3, запирающему транзистора VT13 и отпирающему транзистора VT12. Выходной вывод усилителя OUT через транзистор VT12 подключается к шине корпуса.

В исходное состояние схема возвращается за счет обратной связи через транзистор VT2: когда потенциал в узле u3 превысит  $U_{OP}$  на величину, превышающую пороговое напряжение транзистора VT2, транзистор открывается, происходит заряд входного узла усилителя-преобразователя EL до напряжения  $U_{OP}$ , на входе EL усилителя-преобразователя восстанавливается напряжение, равное  $U_{OP}$ , и схема возвращается в исходное состояние, завершив формирование отрицательного импульса.

Делитель напряжения на транзисторах VT11, VT5 формирует напряжение на затворах транзисторов VT3, VT4, работающих в режиме «токового зеркала», определяя величину их тока.

Крутизна стокowo-затворной характеристики транзистора VT1 низкая и поэтому не влияет на процесс формирования импульсов, но предохраняет от возможного натекания положительных зарядов на вход ЕЛ усилителя-преобразователя.

Размеры транзисторов VT12, VT13 выбраны из условия обеспечения перезаряда нагрузочной емкости до 1,5 пФ на частоте 5 МГц и определяют величину емкости узла u3. Скорость перезаряда узла u3 определяет быстродействие усилителя-преобразователя. Величина токов  $I_3$  и  $I_4$  транзисторов VT3 и VT4 выбирается из компромисса между быстродействием и мощностью потребления и должна обеспечить работу усилителя-преобразователя на частоте не менее 5 МГц.

Поскольку длина каналов транзисторов VT6, VT7 и ширина канала транзистора VT7 выполнены минимально допустимыми для используемой технологии, ширина транзистора VT6 выбирается в  $k$  раз больше минимальной для обеспечения требуемой чувствительности, то есть

$$L_6=L_7=L_{\min}; \quad W_7=W_{\min}; \quad W_6=kW_{\min}.$$

Токи транзисторов VT6 и VT7 равны соответственно

$$I_6 = 0,5\beta_6(U_{OP} - U_2 - V_T - \Delta U_{BX})^2;$$



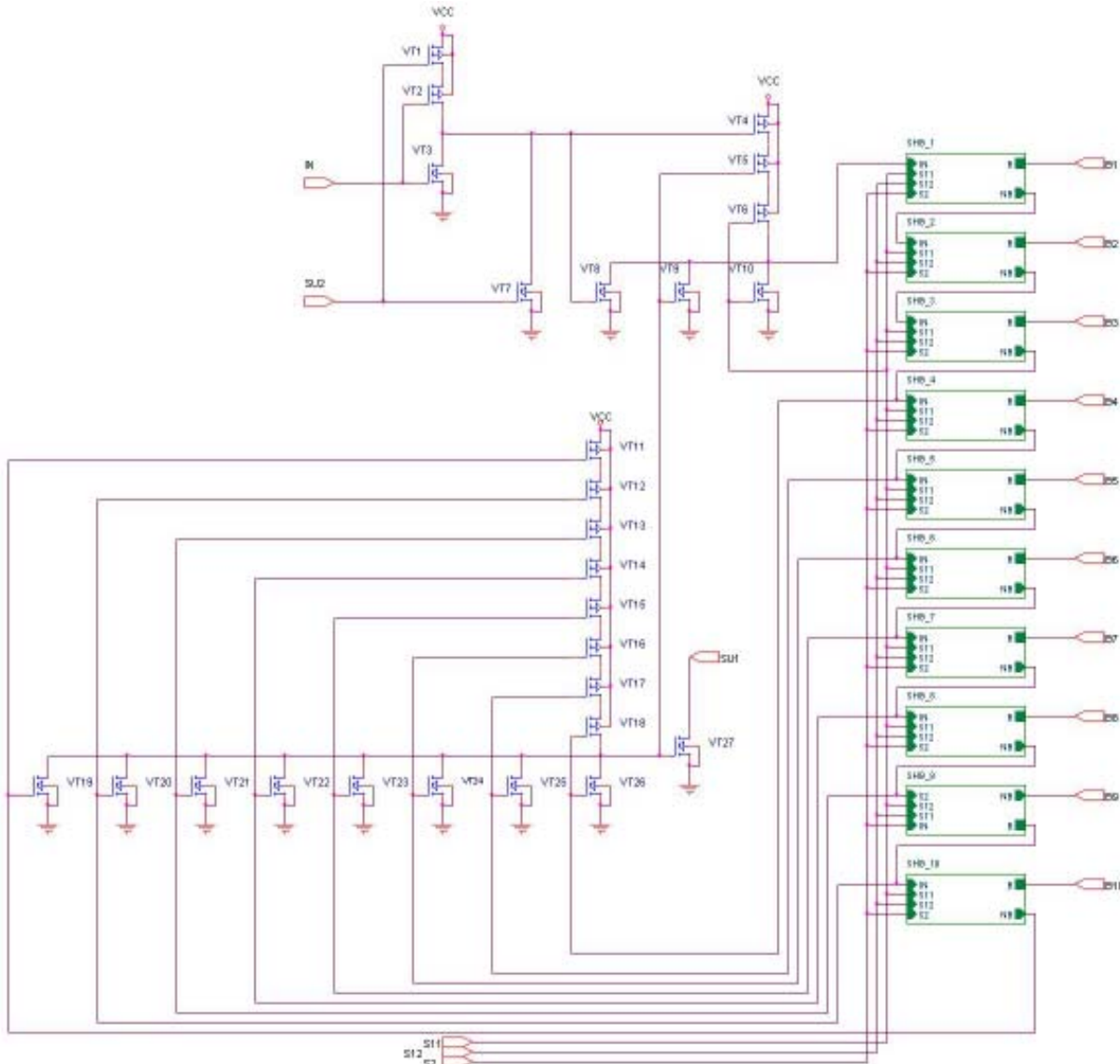


Рис. 5. Электрическая функциональная схема 10-разрядного счетчика

$$I_7 = 0,5\beta_7(U_{OP} - U_2 - V_T)^2,$$

где  $\beta_6, \beta_7$  — крутизна транзисторов VT6 и VT7,

$$\beta_6 = \mu_n C_0 k W_{\min} / L_{\min},$$

$$\beta_7 = \mu_n C_0 W_{\min} / L_{\min},$$

$V_T$  — пороговое напряжение этих транзисторов;

$U_2$  — потенциал узла u2;

$\mu_n$  — подвижность носителей в  $n$ -канальных МОП-транзисторах;

$C_0$  — удельная емкость затвора МОП-транзисторов.

Поскольку  $I_6 + I_7 = I_3$ , в точке переключения  $I_6 = I_7 = 0,5I_3$ .

Обозначим  $U_{OP} - U_2 - V_T = V_{e7}$  (эффективное управляющее напряжение транзистора VT7) и тогда сможем записать

$$I_6 = 0,5\mu_n C_0 \frac{k W_{\min}}{L_{\min}} (V_{e7} - \Delta U_{BX})^2 = 0,5I_3$$

Отсюда ширина канала транзистора VT6, соответствующая чувствительности усилителя-преобразователя  $\Delta Q_{BX}$ , равна

$$W_6 = k W_{\min} = \frac{I_3 L_{\min}}{\mu_n C_0 (V_{e7} - \Delta Q_{BX} / C_{BX})^2}.$$

#### Работа счетчиков в режимах «Счет» и «Считывание»

Для подсчета импульсов, поступающих с выходов усилителей-преобразователей, в микросхеме используются 384 10-разрядных счетчика, которые в режиме «Счет» работают параллельно, а в режиме «Считывание» — последовательно.

С целью оптимизации нагрузки для узлов, формирующих сигналы управления счетчиками, последние делятся на шесть блоков (STSH\_1... STSH\_6 на рис. 1) по 64 блока счетчика в каждом (SH\_1...SH\_64 на рис. 2).

На рис. 2 приведена электрическая функциональная схема такого блока, а на рис. 5 — электрическая функциональная схема 10-разрядного счетчика, реализованного на *D*-триггерах. Разряды счетчика (SHB\_1...SHB\_10 на рис. 5) имеют счетный вход IN, вход начальной установки S12 и два комплементарных выхода — прямой В и инверсный — NB. Прямой выход В в режиме «Счет» находится в третьем состоянии.

На входы IN счетчиков SH\_1...SH\_64 (рис. 2) поступают импульсы с выходов OUT усилителей-преобразователей DIF\_1...DIF\_64 и подаются на вход IN 1-го разряда SHB\_1 счетчика через схему на транзисторах VT1...VT10 (рис. 5), разрешающую счет и блокирующую подачу импульсов при переполнении счетчика, при считывании информации с данного счетчика или по сигналу STOP (рис. 2, 3).

Чтобы избежать переполнения счетчика 1024-м импульсом, что привело бы к обнулению 10-разрядного счетчика и утере информации, остановка счета производится после 1020-го импульса. Эту операцию выполняет схема совпадения на транзисторах VT11...VT27 (рис. 5), на которую подаются сигналы с инверсных выходов NB восьми старших разрядов счетчика. Напряжение высокого уровня с выхода этой схемы блокирует вход первого разряда счетчика, а сигнал с выхода SU1 через инвертор на транзисторах VT38 и VT39 (рис. 2) поступает на блок входного формирователя VPP (рис. 1), и на внешней контактной площадке PP формируется напряжение низкого уровня (признак переполнения). Другие (не переполненные) счетчики при этом могут продолжать счет. Таким образом реализуется вариант считывания без остановки счета.

Во втором варианте считывания по команде STOP блокируется счет во всех счетчиках и выполняется последовательное считывание информации со всех счетчиков с последующим их обнулением. После окончания считывания снимается блокировка и возобновляется счет.

Сигналом STOP одновременно блокируется счет во всех счетчиках микросхемы, при этом на входы SU2 всех счетчиков SH\_1...SH\_64 (рис. 2, 5) подается напряжение высокого уровня.

Для обеспечения последовательного считывания информации из счетчиков используется 384-разрядный последовательный регистр сдвига (на рис. 2, схемы RS\_1...RS\_64), который выполняет роль дешифратора счетчиков. Регистр реализован на *D*-триггерах. Разряды регистров имеют информационный вход SU5, тактовый вход SU4, вход начальной установки SU3 и два комплементарных выхода — прямой S11 и инверсный S2 (рис. 2). По тактовому импульсу CLK (рис. 1, 3) данные с информационного входа SU5 разряда регистра переносятся на его выход S11.

Вход SU3, на который поступает сигнал с входного формирователя FREAD (рис. 1), служит для обнуления содержимого регистров (при высоком уровне напряжения на входе) и обеспечивает включение регистров в режиме считывания (при низком уровне).

Начало считывания задается подачей на вход микросхемы сигнала BREK (рис. 1, 3), который после входного формирователя FBREK поступает на вход BRE первого блока счетчиков STSH\_1 (рис. 1) и через инверторы на транзисторах VT27...VT30 (рис. 2) на вход SU5 первого разряда RS\_1 регистра сдвига.

Одновременно сигнал BRE через инвертор на транзисторах VT27 и VT28 и схему на транзисторах VT31...VT36 подается на вход SU5 регистра RS\_66, и на выходе S11 этого регистра устанавливается высокий потенциал, который включает выходные усилители блока счетчиков (транзисторы VT1...VT24 на рис. 2) на время считывания информации с этого блока.

Импульс BRE, последовательно сдвигаясь вдоль сдвигового регистра тактовыми импульсами CLK, поочередно подключает к считыванию 384 счетчика. По переднему фронту тактового импульса CLK сигнал BRE принимается регистром, а по заднему фронту на выходах S11 и S2 разряда регистра устанавливаются, соответственно, высокий и низкий уровни напряжения, которые подаются на соответствующие входы счетчика и подключают выходы B1...B10 (рис. 2) считываемого счетчика к соответствующим шинам данных, и информация со считываемого счетчика через выходные усилители блока и выходные формирователи FQ1...FQ10 поступает на выходы микросхемы Q1...Q10 (рис. 1). При этом выходы B1... B10 (рис. 2) невыбранных счетчиков находятся в третьем состоянии.

Сигнал с выхода S11 считываемого разряда регистра подается также на вход S12 (рис. 2) предыдущего (уже считанного) счетчика, что возвращает последний в исходное состояние.

После окончания считывания счетчика выхода S11 (рис. 2, 5) этого разряда регистра возвращается в состояние низкого уровня напряжения, которое, поступая на соответствующий вход S11 (рис. 5) счетчика, снимает в нем блокировку счета и открывает вход считанного счетчика для приема новой информации с выхода усилителя-преобразователя.

Для обнуления 64-го счетчика блока счетчиков служит дополнительный, 65-й разряд регистра (RS\_65 на рис. 2) в каждом блоке, который работает параллельно с первым разрядом регистра следующего блока счетчиков, но при этом выполняет только одну функцию — обнуление 64-го счетчика блока. Это сделано для упрощения конструкции топологии кристалла.

После считывания информации с последнего, 64-го счетчика блока сигнал с выхода S11 разряда RS\_64 (рис. 2) сдвигового регистра подается на выход ERE блока счетчиков и является импульсом окончания считывания блока, который используется в качестве импульса BRE начала считывания для следующего блока. Когда информация считана из всех 384 счетчиков, расположенных на кристалле, на внешнем выводе EREK (конец считывания с кристалла) появляется импульс высокого уровня, который при применении в приборе нескольких кристаллов

СБИС может быть использован в качестве импульса *BREK* (рис. 1) для считывания информации со следующего кристалла.

Сигнал с выхода S11 разряда RS\_64 сдвигового регистра в блоках счетчиков подается на транзисторы VT33, VT35 (рис. 2), и после считывания 64-го счетчика блока на выходе схемы на транзисторах VT31...VT36, к которому подключен вход SU5 регистра RS\_66, устанавливается низкий потенциал, регистр RS\_66 переключается, и на выходе S11 этого регистра устанавливается низкий потенциал, который блокирует входы выходных усилителей соответствующего блока счетчиков, и на его выходах DB1...DB10 (рис. 1, 2) устанавливается третье (высокоимпедансное) состояние. Кроме того, низкий потенциал с выхода S11 разряда RS\_66 сдвигового регистра поступает на вывод RE блока счетчиков. Сигналы RE с блоков счетчиков STSH\_1...STSH\_6 (рис. 1) подаются на соответствующие входы RE1...RE6 блока FQE.

#### Формирователи входных и выходных сигналов

Все входные формирователи работают при типовых для КМОП ИС уровнях входных сигналов (низкий логический уровень  $0,3V_{cc}$ , высокий логический уровень  $0,7V_{cc}$ ).

Входные формирователи FBREK, FREAD, FSTOP, FCLK (рис. 1) усиливают входные сигналы по амплитуде до  $V_{cc}$  и формируют сигналы с требуемыми нагрузочной способностью и фронтами.

Входной формирователь FQE (рис. 1) вырабатывает сигнал QE, который при низком уровне напряжения на входе QE включает выходные формирователи FQ1...FQ10, а при высоком уровне напряжения на входе QE переводит выходы Q1...Q10 в третье состояние – высокоимпедансное состояние выхода, при котором оба выходных транзистора закрыты, что при использовании в приборе МКЧД нескольких СБИС позволяет объединять соответствующие выходы микросхем.

Входной формирователь FQE (рис. 1) включает дополнительную схему, которая разрешает включение выходных формирователей FQ1...FQ10 только во время считывания информации со счетчиков SH1...SH384 (рис. 2). После считывания с последнего счетчика SH384 на всех входах RE1...RE6 устанавливается напряжение низкого уровня, при этом формирователь FQE блокирует включение выходных формирователей FQ1...FQ10, и на выходах Q1...Q10 устанавливается третье состояние. Выходные формирователи FQ1...FQ10 (рис. 1) обеспечивают усиление по мощности сигналов, последовательно поступающих с 384 счетчиков через выходные усилители блока счетчиков, для обеспечения нагрузочной способности выходов микросхемы Q1...Q10 до 100 пФ.

Формирователь сигнала FPP (рис. 1) выполнен по схеме с открытым стоком. В случае пере-

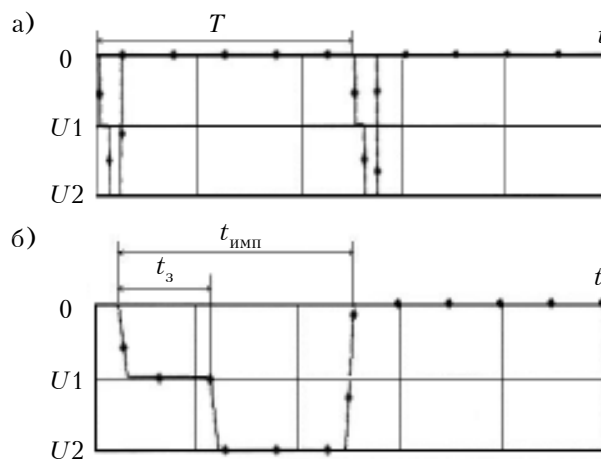


Рис. 6. Последовательность тестовых импульсов (а) и их форма (б) при проверке быстрого действия схемы в режиме счета

полнения какого-либо счетчика выходной транзистор этого формирователя открывается и подключает вывод PP к шине корпуса. Это состояние сохраняется на выводе PP до окончания считывания информации с переполненного счетчика (рис. 3).

Формирователь сигнала завершения считывания микросхемы FERЕК усиливает по мощности сигнал, поступающий с выхода S11 384-го разряда регистра сдвига на внешний вывод EREK (рис. 1), обеспечивая необходимую нагрузочную способность.

Применение в приборе МКЧД нескольких СБИС позволит увеличить длину фокальной плоскости детектора (до 5 см при использовании пяти СБИС). В этом случае вывод EREK предыдущей микросхемы подключается ко входу BREK последующей, формируя единый последовательный сдвиговый регистр на 1920 разрядов (при пяти СБИС). При этом импульс *BRE* подается на вход BREK первой СБИС и, последовательно сдвигаясь вдоль сдвигового регистра, подключает к считыванию 1920 счетчиков. И хотя соответствующие выходы Q1...Q10 всех микросхем соединены, в активном состоянии находятся выходы только той СБИС, с которой в данный момент производится считывание, а выходы остальных СБИС будут находиться в третьем состоянии.

#### Режим «Тестирование»

В связи с тем, что рабочий режим схемы можно реализовать только в составе какого-либо устройства, например спектрометра, для ее тестирования предусмотрен специальный тестовый режим. Для этого в схему введены специальные тестовые входы TEST1 и TEST2 (рис. 1, 2), которые через емкостную связь подключены ко входным электродам ЕЛ: TEST1 – к нечетным, TEST2 – к четным.

При подаче на тестовые входы TEST1 и TEST2 (рис. 3) отрицательных импульсов по передне-

му фронту импульсов на входных электродах наводится отрицательный заряд, величина которого определяется амплитудой отрицательного импульса и величиной емкости связи  $C$  между тестовым электродом и входом ЕЛ усилителя-преобразователя DIF. Это позволяет имитировать работу микросхемы в режиме управления зарядом, проводить проверку функционирования и оценку чувствительности микросхемы.

В связи с тем, что по заднему фронту тестового импульса на входе усилителя-преобразователя наводится положительный заряд, который стекает через высокоомный транзистор VT1 (рис. 4) в течение нескольких микросекунд, для проверки быстродействия схемы в режиме счета используются импульсы специальной формы (рис. 6) с периодом  $T \geq 5$  мкс. В этом случае рабочая частота в режиме счета определяется по формуле

$$F_{\text{имп}} = 1/t_3,$$

где  $t_3$  — длительность задержки между фронтами импульса специальной формы (рис. 6, б).

### Заключение

Разработанная СБИС вместе с двумя МКП типа F2370-01 (фирма Hamamatsu, Япония) в шевронной сборке использованы при разработке микроканального координатно-чувствительного детектора в НИИ микроприборов НАНУ. Проведенные в Институте прикладной физики НАНУ исследования экспериментальных образцов прибора в составе лазерного масс-спектрометра MC3103 (производство АО «СЭЛМИ», Украина) подтвердили его высокую чувствительность — зафиксированы изотопы сурьмы Sb121 и Sb123, атомная концентрация которых составляла соответственно всего 0,0008 и 0,0006%. Использование такого детектора в лазерном масс-спектрометре в качестве приемника ионов изотопов позволяет регистрировать результаты анализа в режиме реального времени и проводить юстировку масс-спектрометра по конкретным изотопам примесных элементов. Это позволит значительно сократить время анализа, повысить его точность и чувствительность при снижении расхода проб, что особенно важно при анализе наноматериалов, а также оперативно управлять процессами создания материалов.

Такие детекторы могут быть использованы для модернизации масс-спектрометров и для создания других современных приборов для регистрации профилей и пространственного расположения пучков нейтральных и заряженных частиц.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сидоренко В. П., Вербицкий В. Г., Прокофьев Ю. В. и др. СБИС для микроэлектронного координатно-чувствительного детектора приборов элементного анализа материалов // Технология и конструирование в электронной аппара-

туре. — 2009. — №2. — С. 25–29. [Sidorenko V. P., Verbitskii V. G., Prokof'ev Yu. V. i dr. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2009. N 2. P. 25]

2. Патент України № 94103. Мікроелектронний координатно-чутливий детектор маспектрометра / Борискін О. І., Вербицький В. Г., Сторіжко В. Ю. та ін. — 2011. — Бюл. № 4. [Patent Ukrayini № 94103. / Boriskin O. I., Verbits'kii V. G., Storizhko V. Yu. ta in. 2011. Bull. 4]

3. Allen P. and Holberg D. CMOS Analog Circuit Design. — New York, Oxford: Oxford University Press, 2002.

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 29.05 2012 г.*

Sidorenko V. P., Verbitskii V. G., Prokofiev Yu. V. **Circuit design of VLSI for microelectronic coordinate-sensitive detector for material element analysis.**

*Keywords: VLSI, CMOS technology, microelectronic coordinate-sensitive detector, elemental analysis, convertor amplifier, 10-bit counters.*

There has been designed, manufactured and tested a VLSI providing as a part of the microelectronic coordinate-sensitive detector the simultaneous elemental analysis of all the principles of the substance. VLSI ensures the amplifier-converter response on receiving of  $1,6 \cdot 10^{-13}$  C negative charge to its input. Response speed of the microcircuit is at least 3 MHz in the counting mode and more than 4 MHz in the counter information read-out mode. The power consumption of the microcircuit is no more than 7 mA.

Ukraine, Kiev, RI of Microdevices of NASU.

Сидоренко В.П., Вербицкий В.Г., Прокоф'єв Ю. В. **Схемотехніка НВІС для мікроелектронного координатно-чутливого детектора для елементного аналізу матеріалів.**

*Ключові слова: НВІС, КМОП-технологія, мікроелектронний координатно-чутливий детектор, елементний аналіз, підсилювачі-перетворювачі, 10-розрядні лічильники.*

Розроблено, виготовлено та випробувано НВІС, що дозволяє в складі мікроелектронного координатно-чутливого детектора проводити одночасний аналіз елементного складу речовини. Схема забезпечує спрацьовування підсилювача-перетворювача при надходженні на його вхід негативного заряду величиною  $1,6 \cdot 10^{-13}$  Кл. Швидкодія мікросхеми в режимі рахунку становить не менше 3 МГц, в режимі зчитування інформації з лічильників — більше 4 МГц, струм споживання — не більше 7 мА.

Україна, м. Київ, НДІ мікроприладів НАНУ.

УДК 621.315.592.3

А. И. КОНДРИК

Украина, г. Харьков, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ СБОРА ЗАРЯДОВ В ДАТЧИКАХ $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ С РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОДОВ

*Исследована зависимость эффективности сбора зарядов  $\eta$  в детекторах гамма-излучения на основе CdZnTe от примесного состава материала. Рассмотрены плоскопараллельные, цилиндрические и сферические электроды. Проведен сравнительный анализ  $\eta$  для детекторов с различной формой электродов и определен оптимальный состав материала  $Cd_xZn_{1-x}Te$ , размещенного в межэлектродном промежутке.*

**Ключевые слова:** CdZnTe, сбор зарядов, детекторы, гамма-излучение, моделирование.

Для эффективной работы полупроводниковых детекторов гамма-излучения необходимы материалы с большим атомным номером, большими значениями удельного сопротивления  $\rho$ , подвижности  $\mu$  свободных носителей заряда, времени жизни электронов  $\tau_e$  и дырок  $\tau_p$ . На детектирующие свойства влияет также плотность и молекулярная масса детекторного материала. Материалами, обладающими хорошими детектирующими свойствами и оптимальным сочетанием параметров, являются CdZnTe, HgJ<sub>2</sub>, CdTe и GaAs [1]. Перечисленные электрофизические свойства являются взаимозависимыми и влияют на такой важный технический параметр, как эффективность сбора зарядов детектора  $\eta$ . При регистрации гамма-излучения существует проблема неполного сбора зарядов, связанная с различием в подвижности свободных электронов и дырок, а также малым значением произведения  $\mu\tau$ . На величину  $\eta$  существенное влияние может

оказывать также и геометрия электродов. В настоящее время получили распространение детекторы с плоскопараллельными, цилиндрическими и сферическими электродами.

Нахождение оптимального состава матрицы материала CdZnTe и конфигурации электродов для создания детекторов с максимальной эффективностью сбора заряда экспериментальным путем является дорогостоящим и трудоемким процессом. Проблему неполного сбора зарядов разработчики решают в основном применением различных процедур обработки сигнала, уменьшающими искажения формы линий полного поглощения излучения на амплитудных спектрах. При этом состав самой матрицы и значения  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\tau$  считаются заданными, а влияние состава на  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\tau$  и  $\eta$  вообще не учитывается. Такое влияние, причем для детекторов с различной геометрией электродов, можно быстро и без особых затрат исследовать методом моделирования, и таким об-

Состав матрицы  $Cd_xZn_{1-x}Te$

| Параметры   | Мелкий донор | Дефекты замещения |                  |                 |   | Дефекты, относящиеся к вакансиям и примесям* |                                      |             | Вакансии                      |                              | Ловушки                     |                              |
|---|--------------|-------------------|------------------|-----------------|---|--|--------------------------------------|-------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
|   |              |                   |                  |                 |   |  |                                      |             |                               |                              | элек- тронов                | дырок                        |
|   | Cl           | Ag <sub>Cd</sub>  | As <sub>Te</sub> | P <sub>Te</sub> | V <sub>Cd</sub> <sup>-</sup> Cl <sub>Te</sub> | V <sub>Cd</sub> <sup>-</sup> related         | V <sub>Te</sub> <sup>-</sup> related | Zn- related | V <sub>Cd</sub> <sup>2-</sup> | V <sub>Te</sub> <sup>+</sup> | H <sub>1</sub> <sup>+</sup> | H <sub>2</sub> <sup>2-</sup> |
| Концентрация, 10 <sup>15</sup> см <sup>-3</sup>                             | 3—26         | 5                 | 5                | 5               | 0,5   | 0,5  | 1                                    | 5           | 1                             | 3,5                          | 20                          | 0,8                          |
| Уровень энергии в запрещенной зоне, эВ                                      | 1,59         | 0,1               | 0,06             | 0,08            | 0,11  | 0,13   | 0,14                                 | 0,22        | 0,40                          | 0,406                        | 0,8                         | 0,76                         |
| Площадь сечения захвата носителей заряда, 10 <sup>-16</sup> см <sup>2</sup> | 1            | 2                 | 1                | 1               | 2   | 1  | 0,1                                  | 0,8         | 100                           | 1                            | 0,04                        | 0,15                         |

\* Наличие этих уровней энергии связано с присутствием в матрице соответствующих вакансий и легирующей примеси

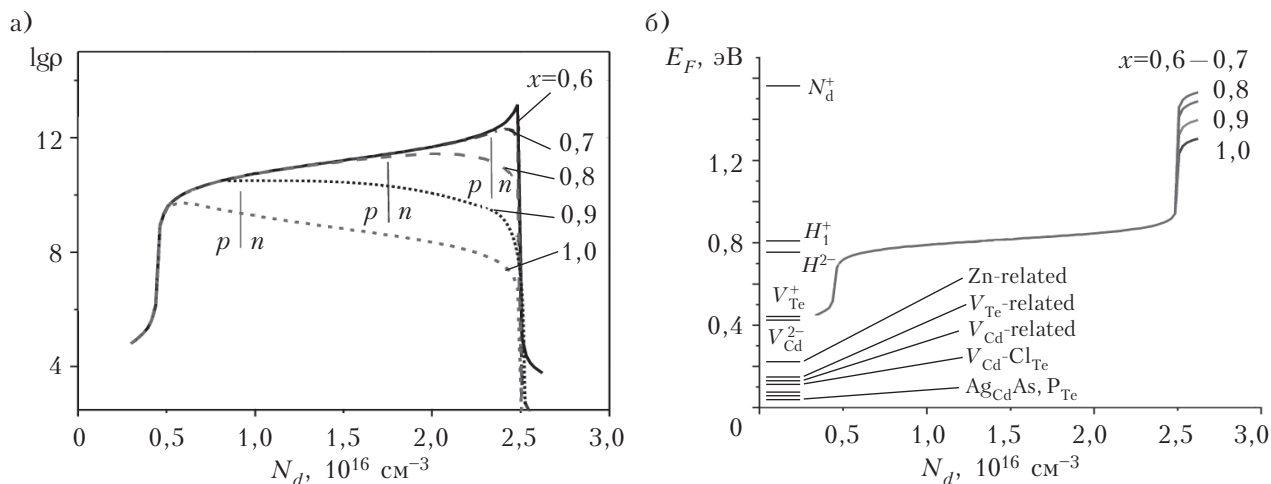


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления  $\rho$  (а) и положения уровня Ферми  $E_F$ , отсчитываемого от валентной зоны (б), от концентрации мелкого донора  $N_d$  в материале  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$  при различных значениях  $x$

разом найти материал оптимального состава и выбрать конфигурацию электродов.

Целью настоящей работы являлось проведение сравнительного анализа эффективности сбора зарядов в детекторах гамма-излучения с электродами различной формы (плоскопараллельные, цилиндрические и сферические) для материалов  $\text{CdTe}$  и  $\text{CdZnTe}$  различного примесного и дефектного состава.

Для вычислений была использована модель и созданная на ее основе программа для расчета  $\mu$  и  $\rho$ , описанные в [2]. Исходный состав материала  $\text{CdZnTe}$  приведен в **таблице**. Такой состав обоснован в [2–4]. Энергия залегания уровней отсчитывается от валентной зоны. Для получения полупроводящего состояния материала (когда концентрация дырок  $p$  примерно равна концентрации электронов  $n$ ) в качестве легирующей примеси мелкого донора с концентрацией  $N_d$ , как правило, используется хлор. Остальные примеси и дефекты являются фоновыми. Их концентрации характерны для материала, полученного методом Бриджмена под высоким давлением [3, 4]. Расстояние между электродами для всех типов детекторов было принято равным 5 мм.

Для уменьшения темновых токов и шумов детектора необходим материал, обладающий как можно большим удельным сопротивлением  $\rho$ . Большое значение  $\rho$  позволяет также снизить время сбора зарядов за счет увеличения напряжения между электродами. Из-за большой разницы в подвижности электронов и дырок (соответственно, 1000 и 70  $\text{cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ) в  $\text{CdZnTe}$  на амплитудных спектрах регистрируются в основном электроны. При этом для увеличения отношения сигнал/фон (уменьшения фоновых шумов) свободные электроны в межэлектродном пространстве должны выступать в качестве неосновных носителей заряда, т. е. нужен высокоомный материал с  $p$ -типом проводимости.

На **рис. 1, а** приведены рассчитанные зависимости удельного сопротивления  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$  от концентрации легирующей примеси мелкого донора  $N_d$  для различных значений мольной доли кадмия  $x$ . Вертикальные линии разграничивают области  $n$ - и  $p$ -проводимости для материалов с разными мольными долями  $\text{CdTe}$ . Из рисунка видно, что материал с  $x=1,0$  ( $\text{CdTe}$ ) обладает наименьшим удельным сопротивлением (не более  $10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) и дырочной проводимостью в довольно узкой области концентраций легирующего мелкого донора. Поскольку возможна неоднородность легирования, в межэлектродном зазоре можно получить области  $n$ -типа или области с недостаточно высоким отношением концентраций свободных носителей заряда  $p/n$ . Это ограничивает применение  $\text{CdTe}$ . Из **рис. 1, а** также видно, что материал при  $x=0,9$  является более предпочтительным по сравнению с  $\text{CdTe}$ , а при  $x=0,6–0,8$  материалы подходят практически идеально. При этом  $\text{Cd}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}\text{Te}$  и  $\text{Cd}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Te}$  обладают наибольшим  $\rho$ , а вся их полупроводящая область имеет  $p$ -тип. С другой стороны, не все допущения, сделанные в принятой модели [2], справедливы по отношению к  $\text{Cd}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Te}$ , поэтому исследование эффективности сбора зарядов проводилось для детекторов на основе  $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te}$  и  $\text{Cd}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}\text{Te}$ .

В материале  $\text{CdZnTe}$ , находящемся в полупроводящем состоянии, уровень Ферми  $E_F$  смещается к середине запрещенной зоны (**рис. 1, б**) и обуславливает частичное заполнение глубоких центров  $H_i^+$ ,  $H_i^{2-}$  и  $V_{Cd}^{2-}$ ,  $V_{Te}^+$ , что включает их в процесс захвата свободных носителей. В результате время жизни неравновесных носителей заряда в  $\text{CdZnTe}$  в полупроводящем состоянии становится порядка 1 мкс.

Первоначально эффективность сбора зарядов рассчитывалась для плоских детекторов на основе  $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$  при  $x=0,6–1,0$ . Было обнаружено, что для всех зарядов межэлектродного



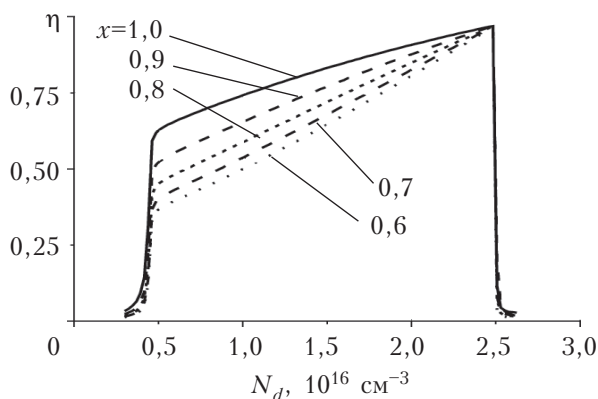


Рис. 2. Эффективность сбора зарядов, дрейфующих от точки с координатой  $d_0=0,5$  мм, в зависимости от  $N_d$  в плоских детекторах на основе материала с различной долей CdTe

промежутка максимальное значение  $\eta$  наблюдается в случае  $x=1,0$ , что соответствует CdTe. Однако, как отмечалось выше, с точки зрения удельного сопротивления и типа проводимости теллурид кадмия — наименее подходящий для наших целей материал (см. рис. 1, а).

Следующим этапом было изучение эффективности сбора зарядов для детекторов из  $\text{Cd}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}\text{Te}$  и  $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te}$  с плоскими, цилиндрическими и сферическими электродами. Сравнительный анализ результатов показал, что  $\eta$  заметно зависит от конфигурации электродов, но почти одинаково для материалов с  $x=0,7$  и  $x=0,8$ .

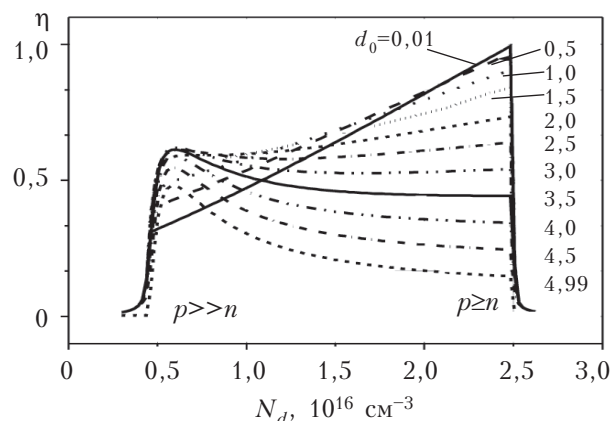


Рис. 3. Эффективность сбора зарядов, дрейфующих от точек с различной координатой  $d_0$ , в зависимости от  $N_d$  в плоском детекторе на основе  $\text{Cd}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}\text{Te}$

Некоторое отличие можно наблюдать лишь для зарядов, диффундирующих от областей, расположенных в непосредственной близости к отрицательно заряженному электроду (рис. 2). Эффективность сбора зарядов для плоскопараллельных детекторов на основе  $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Te}$  подробно исследовалась ранее в [2], поэтому в данной работе исследовалась  $\eta$  для детекторов, выполненных на основе  $\text{Cd}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}\text{Te}$ .

Предельно допустимая напряженность электрического поля  $E$  в межэлектродном пространстве CdZnTe не должна превышать 1000 В/см [5]. В плоскопараллельном детекторе значения

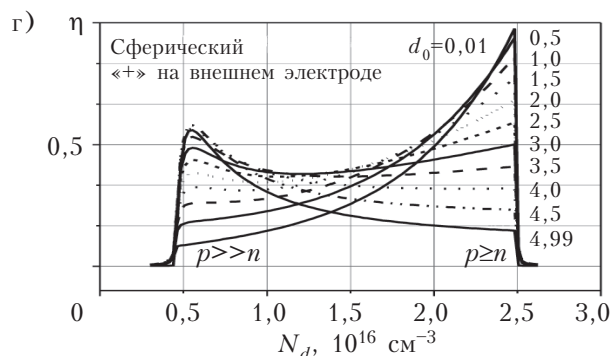
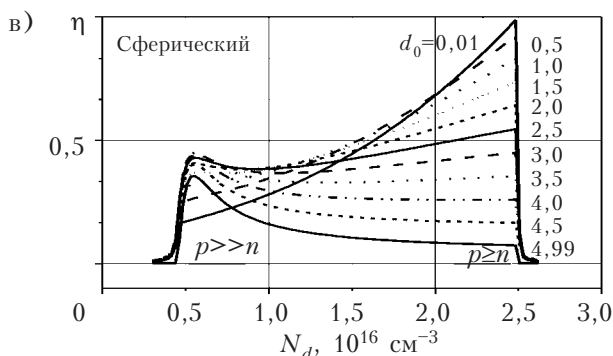
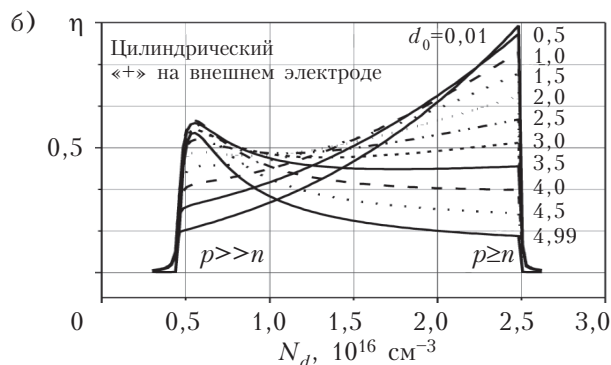
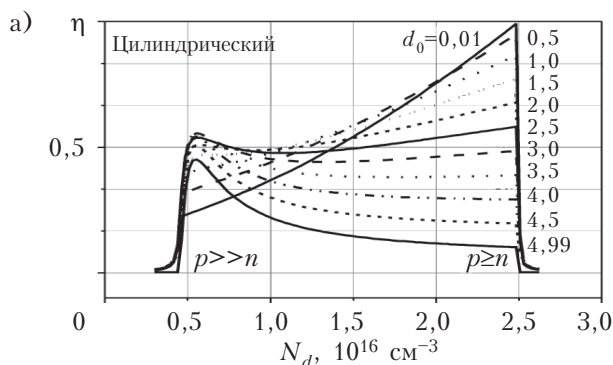


Рис. 4. Эффективность сбора зарядов, дрейфующих от точек с различной координатой  $d_0$ , в зависимости от  $N_d$  в цилиндрическом (а, б) и сферическом (в, г) детекторах на основе  $\text{Cd}_{0,7}\text{Zn}_{0,3}\text{Te}$  в случае когда внешний электрод — коллектор дырок (а, в) или коллектор электронов (б, г)

$\eta$  рассчитывались для электрического поля с  $E=1000$  В/см, постоянного во всем объеме межэлектродного пространства. В случае цилиндрической конфигурации электродов поле изменялось в пределах 500—1000 В/см, а в случае сферической — в пределах 250—1000 В/см.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости  $\eta$  от концентрации легирующей примеси для носителей заряда, дрейфующих от точек с различной координатой  $d_0$  между электродами плоской, цилиндрической и сферической конфигурации (расстояние  $d_0$  отсчитывается от катода). Из анализа зависимостей видно, что для всех типов детекторов характерно следующее. В области, где концентрация дырок  $p$  намного превышает концентрацию электронов  $n$  ( $p \gg n$ ), имеет место максимум  $\eta$  для зарядов, дрейфующих из точек, расположенных в прианодной половине межэлектродного промежутка ( $2,5 \leq d_0 \leq 5$  мм). Этот максимум возникает из-за больших значений  $\tau_p$  при  $p \gg n$ . Следует отметить также, что значение указанного максимума сильно зависит от концентрации дырочных ловушек.

Сбор зарядов, возникших в прикатодной половине ( $0 \leq d_0 \leq 2,5$  мм), возрастает во всей полуизолирующей области с увеличением концентрации компенсирующего мелкого донора и достигает максимальной величины при  $p \geq n$ .

Для электродов различной конфигурации наибольшие значения  $\eta$  для зарядов, дрейфующих из точек с одинаковой координатой, наблюдается в плоском детекторе. У цилиндрического детектора значения  $\eta$  ниже, чем у плоского, а у сферического — самые низкие. Это объясняется тем, что в плоском детекторе на всем межэлектродном промежутке электрическое поле имеет предельную напряженность (1000 В/см). В цилиндрическом и сферическом детекторе поле  $E$  у электрода большего радиуса, соответственно, равно 500 и 250 В/см, достигая предельного значения только у электрода меньшего радиуса.

В области  $p \geq n$  эффективность сбора зарядов приблизительно одинакова для всех детекторов. Сложный характер зависимостей  $\eta(N_d)$  объясняется наличием в матрице глубоких центров  $H_1^+$ ,  $H^{2-}$  и  $V_{Cd}^{2-}$ ,  $V_{Te}^+$  — их зарядовое состояние изменяется по мере изменения положения уровня Ферми, который, в свою очередь, определяется изменением концентрации легирующей примеси (см. рис. 1, б). Изменение зарядового состояния глубоких центров влияет на процессы захвата ими свободных носителей заряда, дрейфующих между электродами детектора. Основную роль здесь играют дырочная ловушка  $H^{2-}$  и электронная ловушка  $H_1^+$ , меньшее влияние оказывают вакансии теллура ( $V_{Te}^+$ ) и вакансии кадмия ( $V_{Cd}^{2-}$ ), хотя концентрация  $V_{Cd}^{2-}$  заметно влияет на величину максимума в области  $p \gg n$ . Большой разброс значений  $\eta$  при различных  $d_0$  в области  $p \geq n$  объясняется большой разницей в

подвижности электронов и дырок, дрейфующих с разных точек межэлектродного промежутка.

Более сильная зависимость  $\eta$  от  $N_d$  в матрице детекторов с цилиндрической и сферической формой электродов, а также опасность электрического пробоя вблизи электрода меньшего радиуса диктуют необходимость более тщательного контроля примесного состава материала детектора.

Благодаря большим значениям  $\eta$  в плоскопараллельном детекторе и простоте его изготовления можно отдать предпочтение ему, однако свои преимущества есть также у детекторов с цилиндрической и сферической конфигурацией электродов. Как видно из рис. 3 и 4, наибольшие значения  $\eta$  наблюдаются при  $p \geq n$  для зарядов, движущихся из точек, расположенных в прикатодной области, что объясняется увеличенным временем жизни электронов в этом случае. В цилиндрических и сферических детекторах большая часть материала находится вблизи внешнего электрода. Если на внешний электрод подать положительный потенциал, увеличится эффективность сбора зарядов электронов, а при обратной полярности — дырок. Как уже отмечалось, на графике зависимости  $\eta$  от концентрации мелких доноров  $N_d$  имеет место ярко выраженный максимум (при  $p \gg n$ ) для зарядов, дрейфующих из прианодной области. Для цилиндрических и сферических датчиков величина этого максимума больше, если внешний электрод заряжен положительно (см. рис. 4).

Все это подсказывает еще один путь увеличения  $\eta$  для рассмотренных типов детекторов. В прикатодную область межэлектродного промежутка можно поместить материал с  $p \geq n$ , а в прианодную — материал с  $p \gg n$ . Для это требуется всего лишь два разных материала, механически соединенных вместе. Расчеты показывают, что увеличение  $\eta$  при этом должно составить не менее 30%.

\*\*\*

Таким образом, установлено, что эффективность сбора свободных носителей заряда главным образом зависит от состава детекторного материала и в некоторой степени — от конфигурации электродов детектора. По совокупности всех параметров привлекательными являются плоские детекторы на основе  $Cd_{0,8}Zn_{0,2}Te$  и  $Cd_{0,7}Zn_{0,3}Te$ . Простой способ увеличения  $\eta$  состоит в использовании межэлектродного материала, состоящего из двух разных по примесному составу материалов. При этом для сферических и цилиндрических детекторов внешний электрод должен служить коллектором электронов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Абызов А. С., Ажажа В. М., Давыдов Л. Н. и др. Выбор полупроводникового материала для детекторов гамма-излучения // Технология и конструирование в электрон-

ной аппаратуре. — 2004. — № 3. — С. 3–6. [Abyzov A. S., Azhazha V. M., Davydov L. N. i dr. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2004. N 3. P. 3]

2. Кондрик А. И. Моделирование детекторных свойств CdZnTe и параметров детекторов  $\gamma$ -излучения на его основе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2004. — № 6. — С. 17–22. [Kondrik A. I. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. — 2004. N 6. P. 17]

3. Castaldini A., Cavallini A., Fraboni B. Deep levels in CdTe and CdZnTe // Journal of Applied Physics. — 1998. — Vol. 83. — N 4. — P. 2121–2126.

4. Hofmann D. M., Stadler W., Christman P., Meyer B. K. Defects in CdTe and Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. — 1996. — Vol. A 380. — P. 117–120.

5. Захарченко О. О. Моделирование дозиметрических характеристик детекторов гамма-випроминювання на основі високоомних напівпровідників. / Автореф. дис. канд. фіз.-мат. наук. — Харків. — ННЦ ХФТИ. — 2009. [Zakharchenko O. O. / Avtoref. dis. kand. fiz.-mat. nauk. Kharkiv. NNTs KhFTI. 2009]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 02.03 2012 г.

Kondrik A. I. **Charges collection efficiency in gamma-ray detectors with different electrodes configuration.**

*Keywords: CdZnTe, charge collection, detectors, gamma radiation, simulation.*

The dependence of the charge collection efficiency  $\eta$  in gamma-ray detectors based on CdZnTe on the impurity composition of the material has been investigated. Plane-parallel, cylindrical and spherical electrodes have been considered. A comparative analysis of  $\eta$  for detectors with electrodes of different shape has been carried out and the optimum composition of the material Cd<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>Te placed in the electrode gap has been determined.

Ukraine, NSC «Kharkov Institute of Physics and Technology».

Кондрік О. І. **Ефективність збору зарядів в датчиках  $\gamma$ -випромінювання з різною конфігурацією електродів.**

*Ключові слова: CdZnTe, збір зарядів, детектори, гамма-випромінювання, моделювання.*

Досліджено залежність ефективності збору зарядів  $\eta$  в детекторах гамма-випромінювання на основі CdZnTe від домішкового складу матеріалу. Розглянуто плоскопаралельні, циліндричні і сферичні електроди. Проведено порівняльний аналіз  $\eta$  для детекторів з різною формою електродів і визначено оптимальний склад матеріалу Cd<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>Te, розміщеного в міжелектродному проміжку.

Україна, м. Харків, ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут».

## РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

Баранов Валентин Владимирович, докт. техн. наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

Глушеченко Эдуард Николаевич, канд. техн. наук, начальник отдела, Научно-производственное предприятие "Сатурн", г. Киев

Иванов Владимир Николаевич, канд. техн. наук, начальник отдела, НИИ "Орион", г. Киев

Корбутяк Дмитрий Васильевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев

Коротеев Вадим Вячеславович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев

Лузин Сергей Юрьевич, докт. техн. наук, старший научный сотрудник, ОАО "Авангард", г. Санкт-Петербург

Митягин Александр Юрьевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино Московской области

Томашик Василий Николаевич, докт. хим. наук, ученый секретарь, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев

Цона Александр Иванович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков

Шокало Владимир Михайлович, докт. техн. наук, профессор, Харьковский национального университета радиоэлектроники, г. Харьков

## ПАМЯТКА АВТОРУ ЖУРНАЛА «ТКЭА»

1. Рукопись должна соответствовать тематике журнала и отличаться прикладной направленностью.

Если результаты получены в смежных областях знаний, необходимо показать их применимость в области интересов журнала.

2. При оценке рукописи редакцию будут интересовать следующие аспекты:

- актуальность темы;
- обоснованность постановки задачи;
- новизна информации (в сравнении с работами предшественников);
- убедительность доказательств;
- правомерность выводов;
- возможность практического применения;
- целесообразность (и адекватность тексту) таблиц, иллюстраций, списка использованных источников;
- строгость терминологии;
- композиция рукописи, в т. ч. оправданность объема.

3. Название рукописи должно быть конкретным и, в то же время, по возможности кратким.

4. Обозначьте разделы рукописи. Выделите выводы (резюме, заключение). Кстати, проверьте себя — насколько согласуются между собой поставленная задача, выводы и название статьи.

5. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а использованные символы (и аббревиатуры) должны быть пояснены при первом их употреблении в тексте.

6. При ссылке в тексте на численные значения, формулы и иные фактические данные, заимствованные из книг, следует (для удобства поиска) указывать не только саму книгу, но и страницу (напр., [2, с. 418]).

7. Список «Использованные источники» формируется в порядке их упоминания в тексте. Желательно избегать ссылок на труднодоступные источники (напр., на материалы конференций) или на недолговечные (напр., Интернет). Принятое в журнале описание источников см. на сайте журнала.

8. Сопроводите рукопись библиографической карточкой на русском и английском языках с аннотацией до 500 печатных знаков. Укажите ключевые слова, а также индекс рукописи по Универсальной десятичной классификации (УДК).

9. Материалы статьи направляйте по e-mail: [tkea@optima.com.ua](mailto:tkea@optima.com.ua). Если Вы направляете рукопись по почте, приложите запись статьи на CD.

Текст статьи набирается на русском или английском языке в текстовом редакторе Microsoft Word размером 12, без переносов, с одним пробелом между словами, с междустрочным интервалом не менее 1,5. Правый край текста выравнивать не обязательно.

Допускается использование программы Equation только в тех случаях, когда Word бессилён, например при наборе специальных знаков над буквенными обозначениями, подкоренных выражений, пределов интегрирования, суммирования и т. п.

С точки зрения удобства верстки желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% от общего объема статьи. Иллюстрации должны быть представлены отдельными файлами. Графики и чертежи следует выполнять в черно-белом (битовом) режиме.

При подготовке цветных иллюстраций желательно фотографировать объекты на однотонном фоне цифровой камерой. Если проводится сканирование изображений, то его необходимо выполнять с разрешением 300 dpi.

10. Снабдите рукопись сведениями об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, должностное положение, дата рождения, служебный и домашний адреса с указанием почтового индекса, e-mail, телефон, телефакс).

11. Если считаете необходимым, сопроводите статью экспертным заключением о возможности ее публикации в открытой печати.





*Восьмая международная специализированная выставка  
оборудования и технологий  
для промышленной автоматизации  
и встраиваемых систем*

# AISS-Automatica-2012

Автоматизация: применение,  
инновации, решения, системы



**20—22 ноября 2012 г.**  
**Выставочный центр «АККО Интернешнл»**  
**Украина, Киев, пр-т Победы, 40**

*Впервые в рамках выставки будет представлена  
специализированная экспозиция электронных компонентов  
и комплектующих*

*Основные тематические разделы экспозиции:*

Электронные компоненты и комплектующие  
Технологическое оборудование и материалы для  
производства изделий электронной промышленности  
Светодиодные технологии, материалы,  
чипы и оборудование для их производства



Контакты  
ООО «Смарт Экспо»  
Украина, Киев, 02095, а/я 24  
тел.факс: +380.44.576.46.06  
тел.факс: +380.44.566.48.61  
моб.: +380.50.462.21.52  
моб.: +380.50.313.45.19  
info @ smart-expo.com.ua  
<http://aiss-automatica.com.ua>

### Комплект малогабаритных вакуумных установок для осаждения пленок из газовой фазы с плазменной активацией



**MBU TM Изофаз-PE CVD**



**MBU TM Изофаз-ICP CVD**

#### Назначение

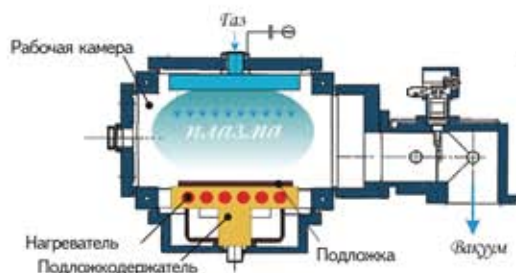
Мелкосерийное производство, технологическое обучение, отработка технологических процессов, научные исследования

#### Специализация

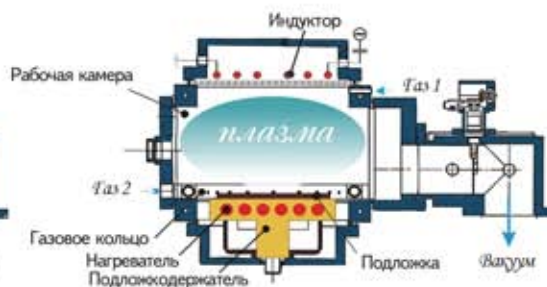
- «MBU TM Изофаз-PE CVD» Малогабаритная вакуумная установка плазмохимического газозольного осаждения с плазменной диодной системой
- «MBU TM Изофаз-ICP CVD» Малогабаритная вакуумная установка плазмохимического газозольного осаждения с ICP-источником плазмы

#### Особенности установок

- Нагрев подложкодержателя до 350°C
- Индивидуальная обработка подложек до Ø150 мм (100×100 мм)
- Безмасляная вакуумная система откачки
- Газовая система, не менее трех линий
- Один-два ВЧ-генератора 13,56 МГц, 300–600 Вт
- Автоматизированное управление от персонального компьютера.
- Потребляемая мощность 3–5 кВт
- Площадь, занимаемая одной установкой ~1,5 м²



**MBU TM Изофаз-PE CVD**



**MBU TM Изофаз-ICP CVD**

ОАО "Научно-исследовательский институт точного машиностроения" (НИИТМ)  
Россия, 124480 Москва, Зеленоград, Пашковское шоссе, 10  
Телефон: +7 (495) 229-75-01 Факс: +7 (495) 229-75-22  
E-mail: info@nitm.ru Сайт: www.nitm.ru

Номер готовили  
Днепропетровск, Киев, Минск, Одесса,  
С.-Петербург, Саратов, Харьков.



Пишите  
Подписывайтесь  
Читайте