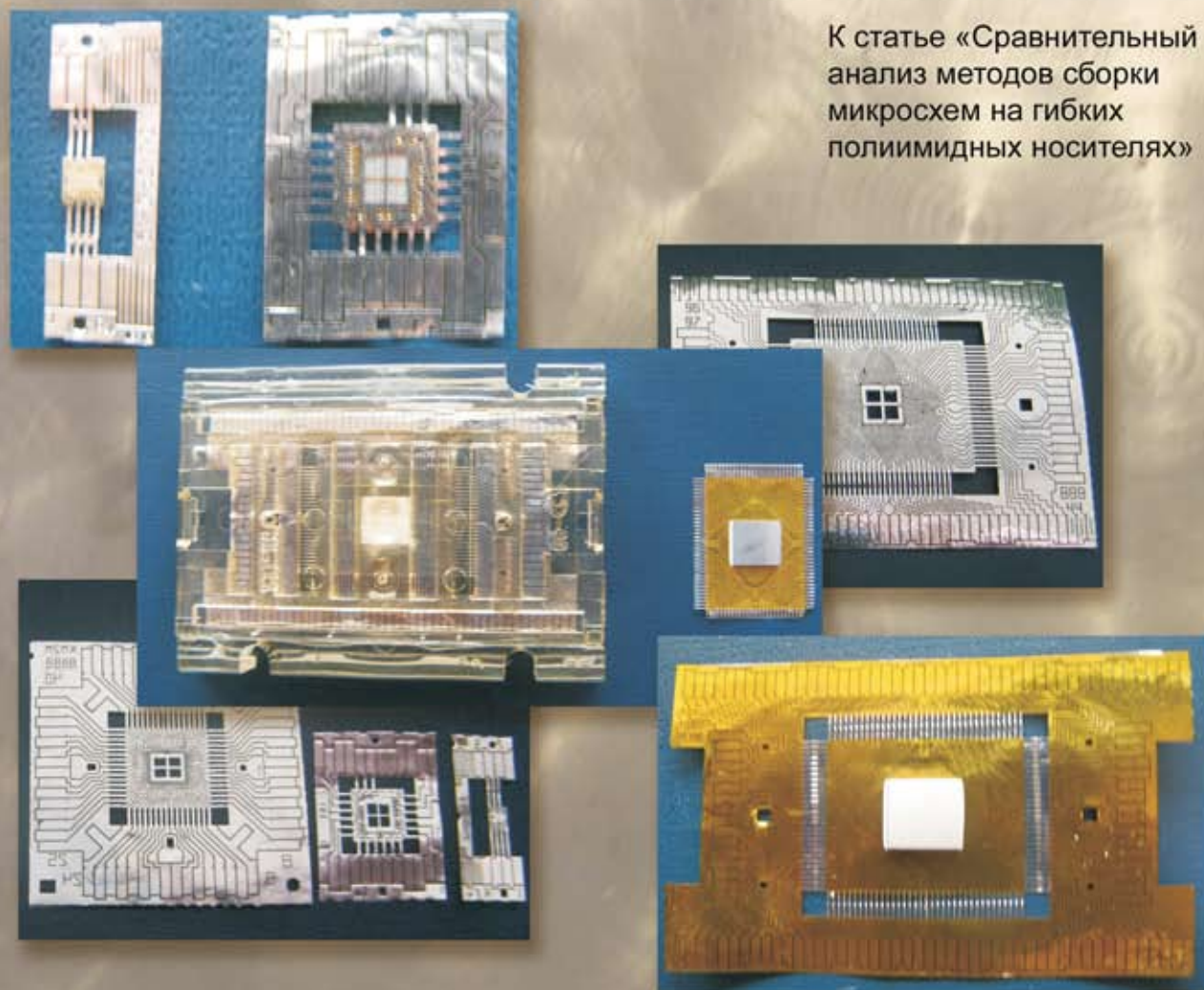


# ТРА

## ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

К статье «Сравнительный  
анализ методов сборки  
микросхем на гибких  
полиимидных носителях»



# 5 2013

СЕНТЯБРЬ — ОКТЯБРЬ



ПЯТНАДЦАТАЯ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



## СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

26 — 30 мая 2014 года  
Украина, г. Одесса

Реквизиты для связи  
e-mail <tkea@optima.com.ua>  
тел. +38 (048) 728-49-46,  
728-18-50.

- Информационные системы и технологии
- Компьютерные системы и компоненты
- Системы и средства искусственного интеллекта
- Защита информации в широкополосных системах и компьютерных сетях
- Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств
- Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии

[www.tkea.com.ua/siet/inf.html](http://www.tkea.com.ua/siet/inf.html)



## 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).

Включен в базы данных DOAJ и РИНЦ



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

### 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](mailto:tkea@optima.com.ua), web-сайт: [www.tkea.com.ua](http://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. Корещук.  
Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Подписано к печати 14.10 2013. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 6,0+1,0. Уч.-изд. л. 8,5. Тираж 200 экз. Заказ № 228.

Издательство «Политехперіодика»  
(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии РА «ART-V»  
(65026, г. Одесса, ул. Гаванная, 3).

**ТЕХНОЛОГИЯ  
И  
КОНСТРУИРОВАНИЕ  
В  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2013

№ 5

Год издания 37-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*К.т.н. В. М. Чмиль*

**СОДЕРЖАНИЕ**

**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. Антощук* (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)  
*Д.ф.-м.н. В. В. Должиков* (г. Харьков)  
*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)  
*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.ф.-м.н. О. И. Шпотюк* (г. Львов)

**УЧРЕДИТЕЛИ**

МПП Украины  
Институт физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарёва  
Научно-производственное  
предприятие «Сатурн»  
Одесский национальный  
политехнический университет  
Издательство «Политехперіодика»

Одобрено к печати Ученым советом  
ОНПУ  
(Протокол № 2 от 18.10 2013 г.)

**Системы передачи и обработки сигналов**

Мобильная радиотехническая система контроля параметров окружающей среды. *Колесник К. В., Шишкин М. А., Кипенский А. В.* 3

Компенсатор поляризационной модовой дисперсии на основе спирально изогнутого одномодового оптоволокна. *Багачук Д. Г.* 8

**Энергетическая электроника**

Определение энергетических и массогабаритных показателей пассивных элементов импульсных преобразователей. *Афанасьев А. М., Еремина А. В.* 13

**Сенсоэлектроника**

Система измерения магнитного поля и температуры с цифровой обработкой сигнала. *Дружинин А. А., Островский И. П., Ховерко Ю. Н., Ничкало С. И., Бережанский Е. И.* 20

**Функциональная микро- и нанoeлектроника**

Микросборка на кремниевой плате для акселерометра. *Спирин В. Г.* 24

**Обеспечение тепловых режимов**

Тепловые режимы системы охлаждения светодиодного светильника на основе тепловой трубы. *Рассамакин А. Б., Быков Е. В., Хайрнaсов С. М., Рассамакин Б. М.* 28

**Технологические процессы и оборудование**

Рафинирование Cd и Zn от примесей внедрения при дистилляции с геттерным фильтром ZrFe. *Кондрик А. И., Солотихин Д. А., Щербань А. П.* 31

Сравнительный анализ методов сборки микросхем на гибких полиимидных носителях. *Вербицкий В. Г., Плис Н. И., Жора В. Д., Грунянская В. П.* 37

Методика расчета параметров УЗ-преобразователей повышенной частоты. *Ланин В. Л., Петухов И. Б.* 42

**Список рецензентов номера** 47

**Новые книги** 7, 12, 19, 46

**Выставки. Конференции** 27

## ЗМІСТ

**Системи передачі та обробки сигналів**

Мобільна радіотехнічна система контролю параметрів навколишнього середовища. *Колісник К. В., Шишкін М. А., Кіпенський А. В.* (3)

Компенсатор поляризаційної модової дисперсії на основі спіральньо зігнутого одномодового оптоволокна. *Багачук Д. Г.* (8)

**Енергетична електроніка**

Визначення енергетичних і масогабаритних показників пасивних елементів імпульсних перетворювачів. *Афанасьєв О. М., Єрьоміна А. В.* (13)

**Сенсоелектроніка**

Система вимірювання магнітного поля і температури з цифровою обробкою сигналу. *Дружинін А. О., Островський І. П., Ховерко Ю. М., Нічкало С. І., Бережанський Є. І.* (20)

**Функціональна мікро- та наноелектроніка**

Мікроборка на кремнієвій платі для акселерометра. *Спирін В. Г.* (24)

**Забезпечення теплових режимів**

Теплові режими системи охолодження світлодіодних світильників на основі теплової труби. *Рассамакін А. Б., Биков Є. В., Хайрмасов С. М., Рассамакін Б. М.* (28)

**Технологічні процеси та обладнання**

Рафінування Cd і Zn від домішок проникнення при дистиляції з гетерним фільтром ZrFe. *Кондрік О. І., Солоніхин Д. А., Щербань О. П.* (31)

Порівняльний аналіз методів складання мікросхем на гнучких поліімідних носіях. *Вербицький В. Г., Пліс М. І., Жора В. Д., Грунянська В. П.* (37)

Методика розрахунку параметрів УЗ-перетворювачів підвищеної частоти. *Ланін В. Л., Петухов І. Б.* (42)

## CONTENTS

**Systems of transfer and processing of signals**

Mobile radio system for environmental control. *Kolesnik K. V., Shishkin M. A., Kipenskiy A. V.* (3)

Compensator of polarization mode dispersion based on spiral-wound single-mode fiber. *Bagachuk D. G.* (8)

**Power electronics**

Determination of power and weight-and-size parameters of passive components of pulsed converters. *Afanasyev A. M., Eremina A. V.* (13)

**Sensoelectronics**

Measuring system for magnetic field and temperature with digital signal processing. *Druzhinin A. A., Ostrovskiy I. P., Khoverko Yu. N., Nchkalov S. I., Berezhanskiy E. I.* (20)

**Functional micro- and nanoelectronics**

Microassembly on silicon board for accelerometer. *Spirin V. G.* (24)

**Thermal management**

Heat management of a cooling system based on the heat pipe for LED lighting fixtures. *Rassamakin A. B., Bykov E. V., Khairnasov S. M., Rassamakin B. M.* (28)

**Technological processes and equipment**

Refining of Cd and Zn from interstitial impurities using distillation with a ZrFe getter filter. *Kondrik A. I., Solopikhin D. A., Scherban' A. P.* (31)

Comparative analysis of methods for the microcircuit assembly on flexible polyimide carriers. *Verbitskiy V. G., Plis N. I., Zhora V. D., Grunyan'skaya V. P.* (37)

Method of calculating the parameters of ultrasonic super-high-frequency transducers. *Lanin V. L., Petukhov I. B.* (42)



УДК 654.93

*К. т. н. К. В. КОЛЕСНИК, к. т. н. М. А. ШИШКИН, д. т. н. А. В. КИПЕНСКИЙ*

Украина, НТУ «Харьковский политехнический институт»

E-mail: kolesniknet@ukr.net, m\_shishkin@inbox.ru, kavkpi@ukr.net

## МОБИЛЬНАЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

*Для передачи информации о состоянии окружающей среды в процессе ее мониторинга с помощью разработанной радиотехнической системы предложено использовать мобильную сотовую связь, что существенно повышает эффективность мониторинга. Экспериментально подтверждена возможность использования предложенной радиотехнической системы для постов экологического контроля.*

*Ключевые слова:* радиотехническая система, мониторинг, окружающая среда, датчик, сотовая связь.

В настоящее время под мониторингом окружающей среды (**МОС**) принято понимать процесс постоянного или периодического наблюдения за состоянием окружающей среды с целью заблаговременного выявления возможных тенденций ее изменения. Процесс мониторинга осуществляется, как правило, по определенной программе, предусматривающей анализ влияния антропогенных источников на окружающую среду, наблюдение за реакцией экологической системы на абиотические факторы, своевременное предоставление достоверной информации, необходимой для предотвращения или снижения неблагоприятных последствий изменения состояния окружающей среды.

Для реализации всех задач МОС используется широкий спектр методов и приемов исследования, а также совокупность информационно-технических подсистем, обеспечивающих измерения параметров окружающей среды, их анализ по определенным методикам, выявление причин отклонения параметров от нормы, определение вариантов решений для ликвидации этих причин [1, 2]. Информационная система МОС [3] позволяет проводить мониторинг состояния воздуха, воды, почвы, геологических и климатических факторов и др. В ряде случаев, особенно при наблюдениях за последствиями экологических катастроф, должна существовать возможность достаточно быстрого развертывания системы в зоне бедствия, в том числе в труднодоступных местах со сложной обстановкой, характеризующейся критическими значениями параметров окружающей среды. В связи с этим средства сбора и обработки первичной информации должны быть мобильными и надежными при эксплуатации в критических условиях. Для передачи первичной информации о состоянии окружающей

среды в таких случаях наиболее целесообразно использовать радиосвязь. Однако и транкинговые системы связи, и спутниковые каналы имеют достаточно большую стоимость как в производстве, так и при эксплуатации. В отличие от них, современные системы мобильной сотовой связи сравнительно недороги при достаточном техническом потенциале. Они обеспечивают хорошее покрытие земной поверхности и способны решать задачи МОС по передаче информации на значительные расстояния с высоким качеством и без значительных дополнительных капиталовложений [4]. Именно поэтому мобильные радиотехнические системы (**МРТС**) контроля параметров окружающей среды (**КПОС**), реализованные с использованием сотовой связи, в ряде случаев обладают неоспоримыми преимуществами для оперативного сбора, обработки и передачи информации МОС.

### Особенности построения МРТС КПОС

В настоящее время на рынке предложений имеется большое количество GSM/GPRS-модемов и контроллеров различных производителей и исполнений. Однако большинство из них, в том числе и предназначенные для обмена информацией с различными промышленными устройствами, не в полной мере соответствуют задачам МОС по передаче информации в условиях критических значений параметров окружающей среды. Еще более сложно подобрать устройства, универсальные с точки зрения сопряжения с датчиками для измерения параметров окружающей среды. В связи с этим авторами был реализован проект по созданию специализированного GSM/GPRS-контроллера на базе встраиваемого GSM/GPRS-терминала фирмы Walecom и микропроцессора ATmega 128 для

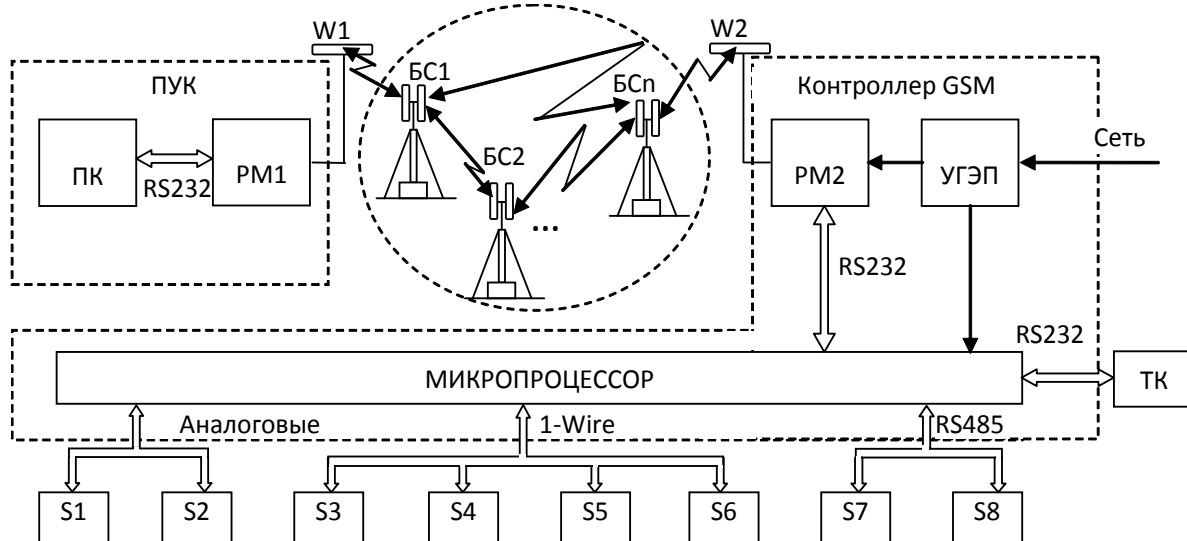


Рис 1. Структурная схема МРТС КПОС

МРТС КПОС, структурная схема которой приведена на **рис. 1**.

Измерение параметров окружающей среды производится при помощи датчиков контроля S1-S8, которые подключаются к микропроцессору GSM-контроллера через соответствующие интерфейсы — аналоговый, 1-Wire или RS485, в зависимости от их исполнения. В состав GSM-контроллера входят микропроцессор, который обеспечивает необходимый алгоритм опроса датчиков, преобразование первичной информации и формирование информационного кадра; радиомодем (PM2) с антенной (W2), который через интерфейс RS232 принимает информационный кадр и через сеть мобильной связи (БС1...БСn) передает его на пульт управления и контроля (ПУК); устройство гарантированного электропитания (УГЭП), обеспечивающее электропитание микропроцессора и радиомодема PM2 от аккумуляторной батареи или от промышленной сети, при ее наличии. Для установки программного обеспечения в микропроцессор GSM-контроллера на этапе его подготовки к эксплуатации применяется технологический компьютер (ТК).

Посредством радиомодемов PM1 и PM2 осуществляется передача не только информации, но и команд управления между GSM-контроллером и ПУК, который расположен в центре обработки информации о состоянии окружающей среды. В качестве ПУК может использоваться персональный компьютер (ПК) со встроенным или с внешним радиомодемом (PM1) с антенной (W1) и специально разработанным программным обеспечением.

Для измерения значений параметров окружающей среды в МРТС КПОС могут быть использованы как цифровые датчики, позволяющие передавать информацию по стандартным ин-

терфейсам 1-Wire или RS485, так и аналоговые датчики с выходным напряжением от 0 до 6,3 В при токах нагрузки не более 1 мА [2].

#### Датчики МРТС КПОС

В МРТС КПОС для измерения значений параметров окружающей среды и обеспечения сохранности системы к ней могут быть подключены следующие датчики:

- климатические (для измерения температуры, влажности, атмосферного давления, направления и скорости ветра, количества осадков, высоты снежного покрова, оптической видимости, уровня солнечной радиации и др.);
- геометрические (для измерений перемещения грунта, уровня воды, высоты облаков и др.);
- химические (для анализа газового состава воздуха — газовые анализаторы, спектрометры, озонометры, спектрофотометры, полярографы, хроматографы и др.);
- пожарные (для определения наличия пламени, дыма, интегральные температурные и др.);
- охранные (для выявления движения и определения присутствия биологических объектов);
- радиационные (для радиационного и дозиметрического контроля и др.).

По принципу преобразования первичной информации используемые датчики подразделяют на сейсмические, акустические, радиочастотные, инфракрасные и др.

В макете МРТС КПОС были использованы датчики из первых двух групп.

При выборе датчиков для МРТС КПОС соблюдались следующие требования:

- соответствие климатической группы исполнения датчика условиям эксплуатации системы в целом;

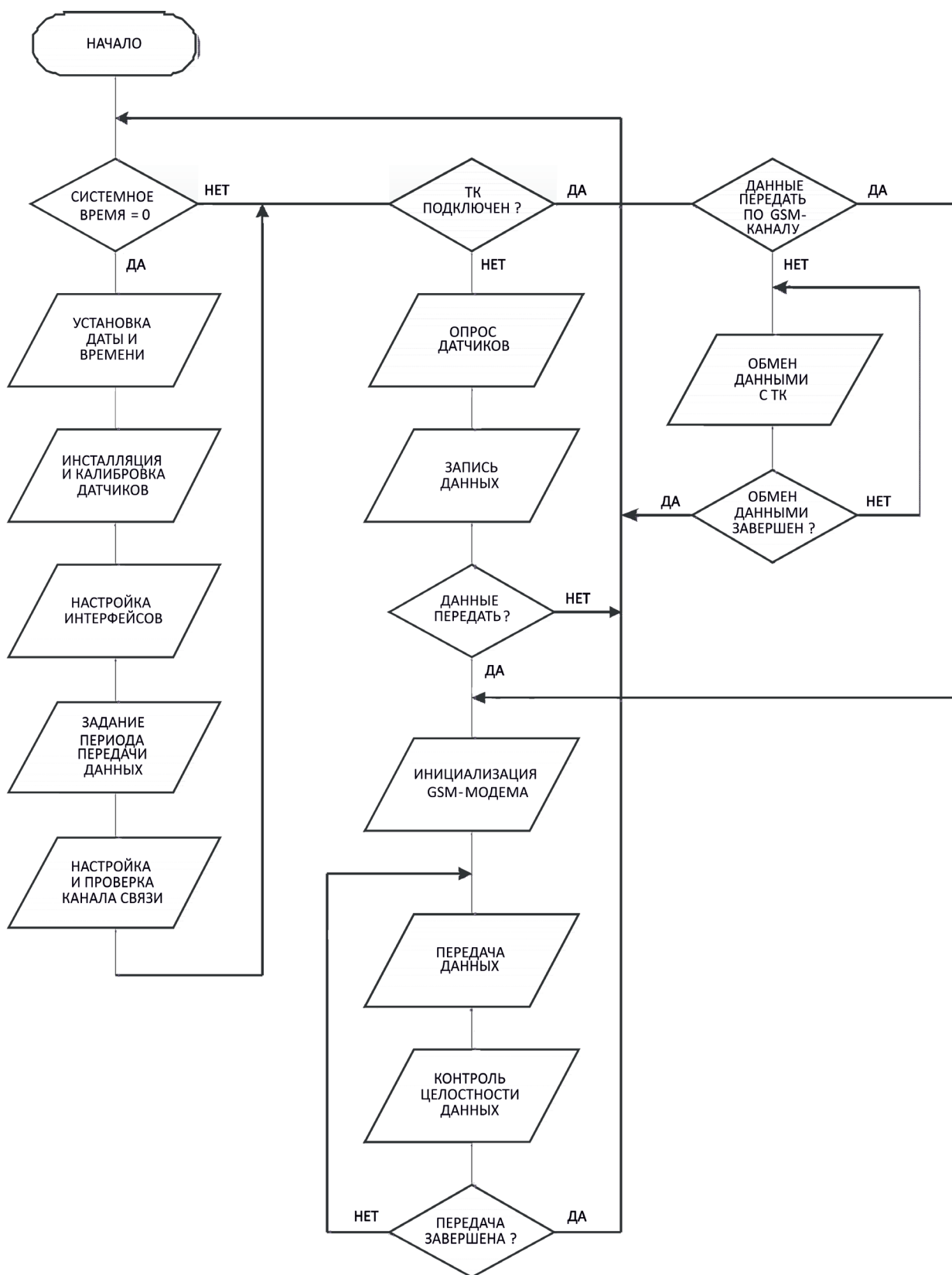


Рис. 2. Алгоритм работы МРТС КПОС

- оптимальное значение общей информативности (с учетом ограничения используемого частотного диапазона канала передачи);
- высокая надежность;
- автономность электропитания или малое энергопотребление при питании от УГЭП.

### Алгоритм работы МРТС КПОС

Блок-схема алгоритма работы МРТС КПОС представлена на **рис. 2**. Этот алгоритм позволяет переключать МРТС КПОС в один из трех режимов: «Настройка», «Автономный», «Командный».

При первичном включении в МРТС КПОС входит в режим «Настройка», в котором осуществляется установка системных даты и времени, инсталляция датчиков и их калибровка, настройка интерфейсов, задание периода считывания информации, настройка и проверка качества связи по GSM-каналу.

После этого система переходит в режим «Автономный», который предполагает циклический опрос инсталлированных датчиков и сохранение полученных данных. В том случае, когда наступает время передачи накопленной информации, происходит инициализация GSM-канала и передача данных при контроле их целостности. По окончании передачи МРТС КПОС переходит на новый цикл опроса и накопления данных.

Если к системе подключен внешний технологический компьютер, она переходит в режим «Командный», при котором возможен принудительный съем накопленных данных через последовательный интерфейс RS232 или их передача по GSM-каналу. Кроме этого, в таком режиме можно корректировать работу системы: изменять количество опрашиваемых датчиков, периодичность передачи информации по GSM-каналу, системные дату и время и др.

### Конструктивные особенности МРТС КПОС

Макет МРТС КПОС [5], разработанный в лаборатории биомедицинской электроники НТУ «ХПИ», имеет пылевлагозащищенное антивандальное исполнение, что позволяет использовать его в качестве необслуживаемого мобильного пункта контроля параметров окружающей среды (см. **рис. 3**, где показан датчик освещенности). МРТС КПОС в своем составе содержит GSM-контроллер (1), датчики (2) и антенну (3).

Блок GSM-контроллера (**рис. 4**), конструктивно представляет собой металлическую сварную коробку (3) с крышкой (1) размерами 200 100 70 мм. Для обеспечения герметичности по периметру коробки имеется фланец (4), а на крышке — резиновая прокладка (2). На крышке блока установлена плата GSM-контроллера (10). Внутренний источник питания (9) со встроенной аккумуляторной батареей (5) позволяет системе

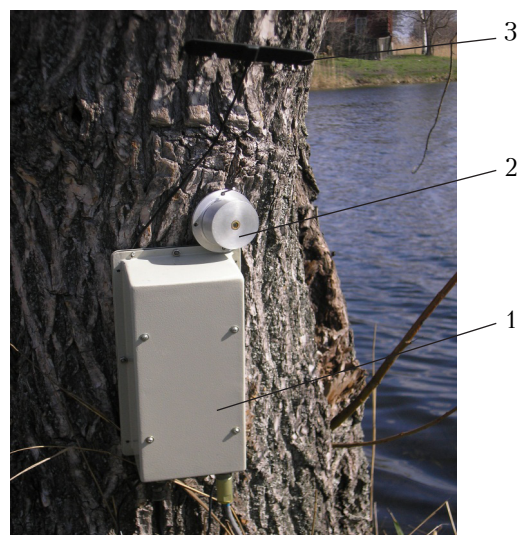


Рис. 3. Пример расположения МРТС КПОС в качестве поста паводкового контроля

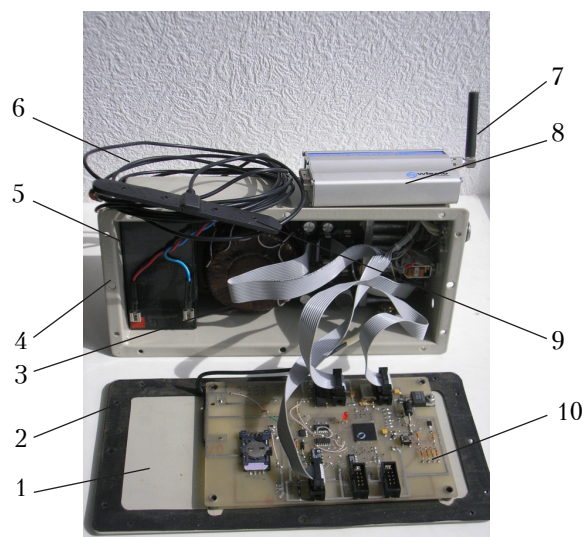


Рис. 4. Внешний вид МРТС КПОС

в дежурном режиме автономно работать до пяти суток. В комплект блока входит антенна (6).

В качестве ПУК в данном варианте МРТС КПОС применен внешний модем Fastrack Wavecom (8) с антенной (7).

\*\*\*

Реализованные в МРТС КПОС принципы сбора и передачи информации о параметрах окружающей среды обеспечивают ее универсальность, мобильность и надежность в эксплуатации, а также сравнительно низкую стоимость и простоту использования. Все это делает такую систему достаточно интересной в качестве быстроразворачиваемого мобильного поста контроля в структуре мониторинга окружающей среды.

Экспериментальная проверка МРТС КПОС подтвердила возможность использования стан-



дартных сетей мобильной GSM-связи для передачи информации о состоянии окружающей среды.

В настоящее время продолжают работы по повышению достоверности передачи данных и надежности аппаратуры за счет применения специальных конструкторско-технологических решений. В дальнейшем предлагается использование МРТС КПОС в составе Единой компьютеризованной системы контроля за функционированием потенциально-опасных объектов Украины.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Колесник К. В., Поляков Г. Е., Чурюмов Г. И., Белотел А. М. Радиотехническая система раннего обнаружения чрезвычайных ситуаций и оповещения людей в случае их возникновения // Тр. X Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2009». — Украина, г. Одесса. — 2009. — Т. 1. — С. 220. [Kolesnik K. V., Polyakov G. E., Churyumov G. I., Belotel A. M. // Tr. X Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. «SIET-2009». Ukraine, Odessa, 2009. Vol. 1. P. 220]
2. Гусельников М. Э., Бородин Ю. В. Методы и приборы контроля окружающей среды и экологический мониторинг. — Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. [Gusel'nikov M. E., Borodin Yu. V. Metody i pribory kontrolya okruzhayushchei sredy i ekologicheskii monitoring. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010]
3. Горшков М. В. Экологический мониторинг. — Владивосток: Издательство ТГЭУ, 2010. [Gorshkov M. V. Ekologicheskii monitoring. Vladivostok: Izdatel'stvo TGEU, 2010]
4. Алексеев В., Моисеенко Д. GSM/GPRS-модемы WAVECOM и пакетная передача данных в системах GSM/GPRS-телеметрии // Компоненты и технологии. — 2003. — № 2. — С. 56–58. [Alekseev V., Moiseenko D. // Komponenty i tekhnologii. 2003. N 2. P. 56]
5. Колесник К. В., Шишкин М. А., Кипенский А. В., Сокол Е. И. Мобильная радиотехническая система экологического мониторинга чрезвычайных ситуаций // Тр. XIV Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2013». — Украина, г. Одесса. — 2013. — Т. 1. — С. 276–279. [Kolesnik K. V., Shishkin M. A., Kipenskiy A. V., Sokol E. I. // Tr. XIV

Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. «SIET-2013». Ukraine, Odessa, 2013. Vol. 1. P. 276]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 08.07 2013 г.*

Kolesnik K. V., Shishkin M. A., Kipenskiy A. V.  
**Mobile radio system for environmental control.**

*Keywords: radio system, monitoring, environment, sensor, cellular communications.*

To convey information about the environment in the process of monitoring using the developed radio system, it is proposed to use a mobile cellular communications system, which significantly increases the effectiveness of monitoring. The possibility of using the proposed radio system at environmental monitoring stations has been confirmed experimentally.

Ukraine, Kharkov National Technical University  
«Kharkiv Polytechnic Institute».

Колісник К. В., Шишкін М. А., Кіпенський А. В.  
**Мобільна радіотехнічна система контролю параметрів навколишнього середовища.**

*Ключові слова: радіотехнічна система, моніторинг, довкілля, датчик, стільниковий зв'язок.*

Для передачі інформації про стан довкілля в процесі його моніторингу за допомогою розробленої радіотехнічної системи запропоновано використовувати систему мобільного стільникового зв'язку, що істотно підвищує ефективність моніторингу. Експериментально підтверджено можливість використання запропонованої радіотехнічної системи для постів екологічного контролю.

Україна, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».

#### НОВЫЕ КНИГИ

##### НОВЫЕ КНИГИ

**Танг Т. Чан. Высокоскоростная цифровая обработка сигналов и проектирование аналоговых систем. — Москва: Техносфера, 2013.**

Книга основана на 25-летнем опыте работы Ph.D Танг Т. Чана в области высокоскоростной цифровой обработки сигналов и компьютерных систем, а также на его курсах по проектированию цифровых и аналоговых систем в Университете Райса (Техас, США). Она содержит практические советы для инженеров по экономичному конструированию, системному моделированию и эффективной практике проектирования цифровых и аналоговых систем. В книге приведены примеры проектирования аудио-, видео- и аналоговых фильтров, памяти DDR и блоков питания. Издание предназначено для студентов старших курсов и аспирантов, исследователей и профессионалов в области обработки сигналов и системном проектировании.



УДК 621.315.616:535.562

Д. Г. БАГАЧУК

Украина, Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова

E-mail: vols@onat.edu.ua

## КОМПЕНСАТОР ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МОДОВОЙ ДИСПЕРСИИ НА ОСНОВЕ СПИРАЛЬНО ИЗОГНУТОГО ОДНОМОДОВОГО ОПТОВОЛОКНА

*Разработан компенсатор поляризационной модовой дисперсии (ПМД) в одномодовом оптическом волокне. Принцип его действия основан на использовании искусственно созданной разницы фазовых скоростей распространения основных обыкновенной и необыкновенной волн в спирально изогнутом волокне, уложенном плотно, виток к витку, на диэлектрический сердечник. Предложенный компенсатор ПМД относится к полностью волоконно-оптическим устройствам и может быть использован в линейных трактах высокоскоростных одно- и многоканальных волоконно-оптических систем передачи со спектральным мультиплексированием, а также оптическим временным мультиплексированием, в волоконно-оптических усилителях, в схемах измерений и т. д.*

**Ключевые слова:** одномодовое оптическое волокно, поляризационная модовая дисперсия, анизотропия, компенсатор дисперсии.

На сегодняшний день одномодовое оптическое волокно благодаря небольшим потерям оптической мощности в них, малой дисперсии светового импульса и другим преимуществам является наилучшей направляющей средой для современных сетей связи и позволяет передавать высокоскоростные широкополосные сигналы на большие расстояния.

При распространении по волоконно-оптическим линиям связи оптические импульсные сигналы претерпевают искажения за счет затухания и дисперсии, что ограничивает, в первую очередь, дальность передачи и требует применения линейных регенераторов или волоконно-оптических усилителей (ВОУ).

С внедрением ВОУ на транспортных телекоммуникационных сетях связи скорость и дальность передачи информации ограничиваются в основном дисперсией — хроматической и поляризационной модовой. В таких условиях все более актуальной становится задача их компенсации. В настоящее время разработано значительное количество методов и устройств компенсации хроматической дисперсии, но почти все они искажают импульсы за счет дополнительных потерь, поляризационной дисперсии, нелинейных эффектов и т. д. Достаточно подробный обзор методов и устройств компенсации хроматической дисперсии приведен в [1]. Однако анализ современных волоконно-оптических систем передачи с ВОУ и компенсаторами хроматической дисперсии показывает, что поляризационная модовая дисперсия (ПМД) становится основным фактором, ограничивающим построение протяженных транспортных сетей связи со скоростью

передачи 40 Гбит/с и выше. Кроме того, в некоторых случаях поляризационная дисперсия может ухудшать качество работы систем связи со скоростью передачи 10 Гбит/с [2]. То есть, вопросы исследования причин появления ПМД и разработки методов и устройств ее компенсации являются актуальными и представляют научный интерес.

В [3] доказано, что при укладке одномодового оптического волокна (**ОМОВ**) на некоторый цилиндр по спиральной линии в нем возникают метрическая и диэлектрическая анизотропии, которые проявляются в двулучепреломлении, различии фазовых скоростей распространения основных обыкновенной и необыкновенной волн с взаимно ортогональными поляризациями. Там же было показано, что благодаря анизотропии в спиральных ОМОВ (**СОМОВ**) наблюдается невзаимное перетекание мощности в плоскости поперечного сечения между указанными волнами. В [4] говорилось о возможности компенсации ПМД за счет спиральной укладки одномодового оптического волокна с определенным шагом на диэлектрический сердечник определенного радиуса. Однако собственно разработка пассивного компенсатора ПМД в этих работах не проводилась.

В настоящее время известен ряд методов компенсации поляризационной дисперсии, которые могут быть разделены на две основные категории [5]:

— электрические методы, основой которых является использование более стойких к влиянию дисперсии форматов модуляции, а также трансверсальных фильтров (линейных фильтров с разветвленной линией задержки);

— оптические методы, реализуемые на базе различных схем компенсаторов, которые включаются непосредственно в оптической области линейного тракта систем передачи.

Известны также полностью оптические устройства, которые могут быть использованы для компенсации поляризационной дисперсии: компенсатор на основе кристаллов ниобата лития, скрученные однополяризационные волокна, оптические фазовые фильтры, волоконные Брегговские решетки.

Как электрические, так и оптические методы компенсации ПМД имеют свои преимущества и недостатки. К недостаткам электрических относятся зависимость степени компенсации от скорости передачи и формата информации, меньшая величина компенсации по сравнению с оптическими методами, ограниченность компенсации дисперсии одним каналом. Известные же оптические компенсаторы имеют высокую стоимость и сложны в изготовлении.

Целью настоящей работы была разработка компенсатора поляризационной модовой дисперсии, лишенного указанных недостатков.

Для решения поставленной задачи был предложен метод компенсации, основанный на искусственном создании анизотропии свойств спирально изогнутых одномодовых оптических волокон. Прежде чем перейти к описанию сути метода, рассмотрим причины возникновения ПМД в оптоволокне, уложенном в оптический кабель.

Как известно, в ОМОВ симметричной относительно оси формы существуют две отдельные моды с взаимно ортогональными поляризациями в плоскости поперечного сечения волокна. Волну, поляризованную вдоль направления наибольшего изменения диэлектрической проницаемости, принято называть необыкновенной и обозначать  $HE_{11}^e$ , а ортогональную к ней волну — обыкновенной и обозначать  $HE_{11}^o$ . Если волноводная структура ОМОВ идеально симметрична, то обе моды с ортогональными поляризациями не отличаются между собой, т. к. имеют одинаковую фазовую скорость распростра-

нения и переносят равные значения энергии. В первую очередь по этой причине такие оптические волокна (**ОВ**) называются одномодовыми. Однако в реальных ОМОВ вследствие промышленных дефектов, эллиптичности и эксцентриситета сердцевинки относительно оболочки возникает осевая асимметрия, при которой фазовые скорости распространения двух ортогональных мод будут различными. Кроме того, изгибы оптических волокон в сердечнике кабеля и температурные колебания окружающей среды приводят к появлению анизотропных свойств ОМОВ, вследствие чего происходит взаимное преобразование энергии сигналов мод  $HE_{11}^e$  и  $HE_{11}^o$ , изменяется их поляризация, порождается поляризационная дисперсия сигналов и межсимвольные искажения. Случайно ориентированные в структуре сердцевинки ОВ микрокристаллы стекла также являются причиной деполяризации мод и их взаимного преобразования, что тоже увеличивает поляризационную дисперсию [3].

Таким образом, в одномодовом оптическом волокне импульсный сигнал переносится двумя взаимно ортогональными основными волнами с различными значениями групповой скорости (или групповой задержки). Разность этих значений ( $\Delta\tau$ ) характеризует поляризационную модовую дисперсию переносимого сигнала, вследствие которой длительность суммарного импульсного сигнала на выходе ОМОВ увеличивается ( $\tau_{\text{вых}} > \tau_{\text{вх}}$ ) (рис. 1).

В сердечниках оптических кабелей, где оптические модули с ОМОВ уложены по спиральным линиям, поляризационная дисперсия для строго когерентных сигналов может быть определена как разность значений группового времени распространения (задержки) необыкновенной и обыкновенной волн [3]:

$$\Delta\tau_{\text{л}} = \tau^e - \tau^o = \frac{\partial\beta_1^e(\omega)}{\partial\omega} - \frac{\partial\beta_1^o(\omega)}{\partial\omega}, \quad (1)$$

где  $\tau^o, \tau^e$  и  $\beta_1^e, \beta_1^o$  — соответственно, групповое время и фазовые коэффициенты распространения мод  $HE_{11}^e$  и  $HE_{11}^o$  (ПМД первого порядка) при круговой частоте  $\omega$ .

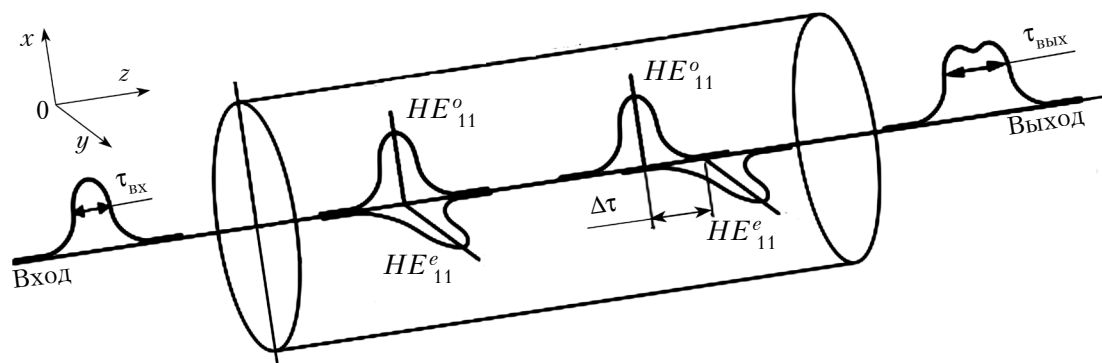


Рис. 1. Схема прохождения импульсного сигнала в оптическом волокне



В [6] показана зависимость  $\Delta\tau_{\text{д}}$  от параметра  $A=p/(4\pi R)$ , где  $p$  и  $R$  — шаг и радиус оси спирального ОМОВ, а также установлено, что в реальных оптических кабелях, где  $A$  изменяется от 2 до 3,7, групповое время распространения необыкновенной волны больше, чем обыкновенной ( $\tau^e > \tau^o$ ), т. е.  $\Delta\tau_{\text{д}} > 0$ . Очевидно, если создать в компенсаторе соответствующую отрицательную разность значений группового времени распространения  $\Delta\tau_{\text{к}} < 0$ , можно достичь полной компенсации ПМД в ОМОВ, когда  $\Delta\tau_{\text{д}} + \Delta\tau_{\text{к}} = 0$  (согласно [6],  $\Delta\tau_{\text{к}} < 0$  в случае, когда  $A < 0,618$ ).

Для искусственного создания ПМД можно использовать эффект, называемый фотоупругостью, когда при приложении механического напряжения в ОМОВ, вследствие изменения показателя преломления, возникает оптическая анизотропия. Если придать этому эффекту некоторую пространственную упорядоченность, это позволит установить определенную ориентацию молекул в структуре стекла ОВ. При укладке волокна в охлажденном состоянии в спиральную линию с постоянным шагом и радиусом молекулы, микрокристаллы стекла, примеси и неоднородности получают ориентацию вдоль силовых линий приложенного механического напряжения. В таком случае наблюдается существенное уменьшение случайного влияния неоднородностей на поляризационную дисперсию и появляется возможность контролировать анизотропию и, соответственно, ПМД путем изменения радиуса и шага укладки ОМОВ.

На основании этого было предложено выполнить компенсатор в виде катушки с диэлектрическим сердечником, на который плотно, виток к витку, намотано одномодовое оптическое волокно. Такая катушка, по сути, совмещает в себе две оптические линии задержки с различными значениями времени задержки для волн  $HE_{11}^e$  и  $HE_{11}^o$ .

В общем виде разница значений группового времени распространения необыкновенной и обыкновенной волн на единицу длины (1 км) спирального ОМОВ для строго когерентной оптической несущей определяется по формуле [6]

$$\Delta\tau = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \omega} \left( \frac{\beta_{10}}{\varepsilon(r)} \right) [(vr - 2\chi r) \cos \varphi + vr \sin \varphi + \chi^2 r^2 \cos^2 \varphi], \quad (2)$$

где  $\beta_{10}$  — фазовый коэффициент распространения моды  $HE_{11}$  в изотропном ОВ (рад/км);

$\varepsilon(r)$  — диэлектрическая проницаемость сердцевины СОМОВ;

$v, \chi$  — соответственно, параметры кручения и кривизны ОВ;

$\varphi$  — угол поляризации необыкновенной волны;

$r$  — эффективный радиус модового пятна (мкм).

Поскольку  $\varepsilon(r) = \sqrt{n(r)}$  ( $n$  — показатель преломления стекла), спектральную зависимость ди-

электрической проницаемости стекла в диапазоне длины волны  $\lambda = 0,2 - 2,0$  мкм можно описать дисперсионной формулой Селмейера [7, с. 66]

$$\varepsilon(r) = n^2(r) = 1 + \sum_{i=1}^3 a_i \lambda^2 / (\lambda^2 - l_i^2), \quad (3)$$

где  $a_i, l_i$  — коэффициенты Селмейера, зависящие от химического состава стекла.

Определив с учетом этого производную  $\frac{\partial}{\partial \omega} \left( \frac{\beta_{10}}{\varepsilon(r)} \right)$  и подставив ее в выражение (2), получим полную формулу для расчета погонной величины поляризационной дисперсии, которая может быть скомпенсирована в катушке:

$$\Delta\tau_{\text{к}} = F \frac{\sqrt{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2}} - \frac{\lambda^2}{n_1} \sum_{i=1}^3 \frac{a_i l_i^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2}}{2c \left( 1 + \sum_{i=1}^3 a_i \lambda^2 / (\lambda^2 - l_i^2) \right)}, \quad (4)$$

где  $F = (vr - 2\chi r) \cos \varphi + vr \sin \varphi + \chi^2 r^2 \cos^2 \varphi$ ;

$c$  — скорость света в вакууме, км/с;

$n_1$  — показатель преломления сердцевинки ОМОВ.

Полученное выражение дает возможность определять ПМД в спирально изогнутых ОМОВ различного химического состава.

В [2] рекомендуется обеспечивать такие условия передачи оптического сигнала, при которых значение  $\Delta\tau$  должно быть меньше одной десятой части периода следования импульсов  $T$ , т. е.  $\Delta\tau < T/10$  или  $\Delta\tau < 1/(10B)$ , где  $B$  — битовая скорость передачи сигналов. Вычисленные в соответствии с этим максимально допустимые значения ПМД для аппаратуры SDH разных уровней иерархии приведены в табл. 1.

Таблица 1

Максимально допустимые значения ПМД в аппаратуре SDH разных уровней иерархии

Уровень иерархии	Битовая скорость $B$ , Мбит/с	Период следования импульсов $T$ , пс	$\Delta\tau$ , пс
STM-1	155	6400	640
STM-4	622	1600	160
STM-16	2500	400	40
STM-64	10000	100	10
STM-256	40000	25	2,5

Следует отметить, что поляризационная модовая дисперсия, которая вызвана, в первую очередь, неоднородностями в оптоволокне, носит случайный характер [9]. В изотропном ОМОВ, где молекулы ориентированы хаотично, не представляется возможным предвидеть характер и расположение неоднородностей его структуры.

По этой причине коэффициент удельной поляризационной дисперсии в международных стандартах нормируется, согласно теории вероятности, на 1 км и имеет размерность пс/км<sup>1/2</sup>.

В табл. 2 в качестве примера приведены результаты расчета значений погонной ПМД, которая может быть скомпенсирована предложенным компенсатором при длине волны  $\lambda=1,55$  мкм. В качестве материала сердцевин ОМОВ принят 100%-ный SiO<sub>2</sub>. Минимальный радиус сердечника  $R_k$  выбран равным 5 мм, что является минимально допустимым радиусом изгиба волокна в соответствии с [8].

Таблица 2

Результаты расчета ПМД в компенсаторе с шагом укладки волокна 250 мкм

$R_k$ , мм	$\Delta\tau_k$ , пс/км
5	-1639,83
6	-1367,48
7	-1172,71
8	-1026,49
9	-912,69
10	-821,61

Разработанный компенсатор поляризационной дисперсии можно изготавливать на базе стандартного ОМОВ (рекомендация G.652) различного химического состава. При этом каждому составу будет соответствовать определенное значение погонной ПМД, которая может быть скомпенсирована в катушке. Величина компенсации будет зависеть в основном от длины уложенного волокна и от радиуса сердечника.

Длину волокна, необходимую для компенсации ПМД величиной  $\Delta\tau_l$ , можно вычислить по формуле

$$L_{BK} = \frac{\Delta\tau_k}{\Delta\tau_l} L_B, \quad (5)$$

где  $L_B$  — длина волокна в линии.

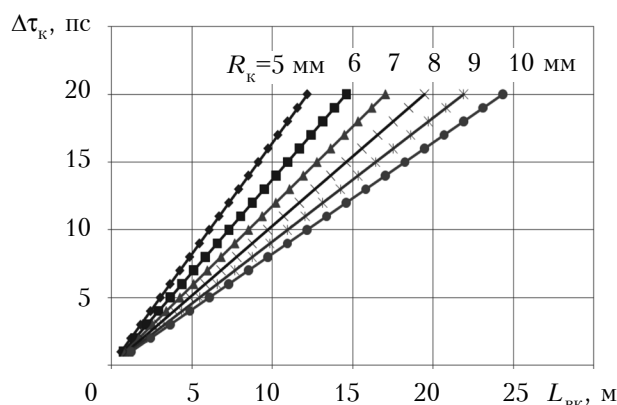


Рис. 3. Зависимость величины компенсации ПМД от длины волокна в компенсаторе при различных значениях радиуса сердечника

Учитывая, что длина одного витка ОВ в компенсаторе составляет  $2\pi(R_k + d_{OB}/2)$ , а шаг укладки ОВ на сердечник радиусом  $R_k$  равен диаметру оптоволоконной  $d_{OB}$ , необходимую длину компенсатора ПМД можно определить по формуле

$$L_k = \frac{L_{BK} d_{OB}}{2\pi(R_k + d_{OB}/2)}. \quad (6)$$

На рис. 3 представлены результаты расчета зависимости компенсированной ПМД от длины ОВ в компенсаторе при разных значениях радиуса сердечника.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что разработанный компенсатор, основанный на анизотропных свойствах спирально изогнутых одномодовых оптических волокон, может полностью скомпенсировать поляризационную модовую дисперсию в пределах от 1 до 20 пс в зависимости от длины волокна и радиуса его спиральной укладки на сердечник. Для компенсации больших значений дисперсии необходимо увеличить длину волокна, уложенного на сердечник радиусом от 5 до 10 мм.

Компенсатор может быть последовательно включен в произвольной точке линейного тракта системы передачи. За счет небольших размеров он может быть установлен в кабельных муфтах, кроссах, усилителях и т. д., то есть в любых местах открытого доступа к ОМОВ линейных оптических кабелей связи. Предложенный компенсатор ПМД относится к полностью волоконно-оптическим устройствам и может быть использован в линейных трактах высокоскоростных одно- и многоканальных волоконно-оптических систем передачи со спектральным мультиплексированием, а также оптическим временным мультиплексированием, в волоконно-оптических усилителях, в схемах измерений и т. д.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Бурдин В. А. Компенсация хроматической дисперсии на регенерационных участках линий передачи сетей связи // Электросвязь. — 2006. — № 7. — С. 28–33. [Burdin V. A. // Elektrosvyaz'. 2006. N 7. P. 28]
- Гладышевский М. А., Щербаткин Д. Д. Чем опасна поляризационная дисперсия? // LIGHTWAVE russian edition. — 2004. — № 4. — С. 33–34. [Gladyshevskii M. A., Shcherbatkin D. D. // LIGHTWAVE russian edition. 2004. N 4. P. 33]
- Макаров Т. В. Когерентные волоконно-оптические системы передачи. — Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2009. [Makarov T. V. Kogerentnye volokonno-opticheskie sistemy peredachi. Odessa: ONAS im. A. S. Popova, 2009.]
- Макаров Т. В., Багачук Д. Г. Спиральные одномодовые оптические волокна как компенсаторы дисперсии импульсных сигналов // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. — 2012. — № 1. — С. 108–111. [Makarov T. V., Bagachuk D. G. // Naukovi pratsi ONAZ im. O. S. Popova. 2012. N 1. P. 108]

5. Govind P. Agrawal lightwave technology: telecommunication systems. — USA: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.

6. Макаров Т. В. Скрученный волоконный световод для когерентной передачи сигналов // Праці УНДІРТ. — 1998. — № 1(13). — С. 22–28. [Makarov T. V. // Pratsi UNDIRT. 1998. N 1(13). P. 22]

7. Корнейчук В. И., Макаров Т. В., Панфилов И. П. Оптические системы передачи. — Київ: Техніка, 1994. [Korneichuk V. I., Makarov T. V., Panfilov I. P. Opticheskie sistemy peredachi. Kiev: Tekhnika, 1994.]

8. Glaesemann G. S., Castilone R. J. The mechanical reliability of corning optical fiber in bending. — Corning White Paper WP3690. — 2002.

9. Складаров О. К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. — Москва: СОЛОН-Р, 2001. [Sklyarov O. K. Sovremennye volokonno-opticheskie sistemy peredachi, apparatura i elementy. Moscow: SOLON-R, 2001.]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 09.09 2013 г.*

**Багачук Д. Г. Компенсатор поляризаційної модової дисперсії на основі спірально зігнутого одномодового оптоволоконна.**

*Ключові слова: одномодове оптичне волокно, поляризаційна модова дисперсія, анізотропія, компенсатор дисперсії.*

Розроблено компенсатор поляризаційної модової дисперсії (ПМД) в одномодовому оптичному волокні. Принцип його дії заснований на використанні штучно створеної різниці фазових швидкостей поширення основних звичайної та незвичайної хвиль в

спірально вигнутому волокні, укладеному щільно, виток до витка, на діелектричний сердечник. Запропонований компенсатор ПМД належить до повністю волоконно-оптичних пристроїв і може бути використаний в лінійних трактах високошвидкісних одно- та багатоканальних волоконно-оптичних систем передачі зі спектральним ущільненням каналів, а також оптичним тимчасовим мультиплексуванням, у волоконно-оптичних підсилювачах, в схемах вимірювань тощо.

Україна, Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова.

**Bagachuk D. G. Compensator of polarization mode dispersion based on spiral-wound single-mode fiber.**

*Keywords: single mode optical fiber, polarization mode dispersion, anisotropy, dispersion compensator.*

A polarization mode dispersion (PMD) compensator for single-mode optical fiber has been designed. Its operation principle is based on the use of artificial difference of phase velocities of the basic ordinary and extraordinary waves in spiral-wound fiber, stacked tightly, one turn close to another on the dielectric core. The proposed PMD compensator belongs to full fiber optic devices and can be used in high linear paths of single and multichannel fiber optic communication systems with wavelength-division multiplexing and with optical time-division multiplexing; in optical fiber amplifiers, in measurement circuits, etc.

Ukraine, A. S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications.

## НОВЫЕ КНИГИ

### НОВЫЕ КНИГИ

**Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. — Москва: Техносфера, 2013.**

В монографии рассматриваются основные разновидности адаптивных фильтров и их применение в радиотехнических системах и системах связи. Дается представление о математических объектах и методах, используемых в теории адаптивной фильтрации сигналов. Рассматриваются приемы получения вычислительных процедур, сами процедуры и свойства таких алгоритмов адаптивной фильтрации, как алгоритмы Ньютона и наискорейшего спуска, алгоритмы по критерию наименьшего квадрата, рекурсивные алгоритмы по критерию наименьших квадратов и их быстрые (вычислительно эффективные) версии; рекурсивные алгоритмы по критерию наименьших квадратов для многоканальных фильтров и их версии для обработки нестационарных сигналов, а также многоканальные алгоритмы аффинных проекций. Дано описание стандартных и нестандартных приложений для моделирования адаптивных фильтров на современных языках программирования MATLAB, LabVIEW и SystemVue, а также реализаций адаптивных фильтров на современных цифровых сигнальных процессорах отечественного и зарубежного производства. Книга является первым систематическим изложением теории адаптивной фильтрации на русском языке.





УДК 621.314

А. М. АФАНАСЬЕВ, А. В. ЕРЕМИНА

Украина, г. Алчевск, Донбасский государственный технический университет

E-mail: alexandr.afanasyev@gmail.com

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

*Предложен метод расчета мощности потерь и массы пассивных элементов импульсных преобразователей (ИП) в зависимости от коэффициента пульсации тока в накопительной катушке индуктивности и от частоты коммутации. Метод позволяет проводить оптимизацию энергетических и массогабаритных показателей, а также режимов работы ИП. Приведены графические зависимости, построенные при использовании предложенного метода, анализ которых позволил определить условия для получения минимальной мощности потерь и массы пассивных элементов ИП.*

*Ключевые слова: импульсный преобразователь, пассивные элементы, мощность потерь, массогабаритные показатели, коэффициент пульсации тока, частота коммутации.*

В настоящее время одной из основных тенденций развития импульсных преобразователей (ИП) является разработка энергоэффективных и ресурсосберегающих способов преобразования электрической энергии, которые обеспечивают минимизацию мощности потерь, массы, габаритов и стоимости устройства.

Для обеспечения требуемого теплового режима ИП практический интерес представляет выбор оптимальных параметров накопительной катушки индуктивности (НКИ), которая определяет величину пульсации тока во всех элементах схемы, а следовательно, оказывает влияние как на мощность потерь в активных и пассивных элементах ИП, так и на их массу и габариты. Пульсации тока в НКИ, в свою очередь, определяют режим протекания тока в ней. Достаточно часто используемый в ИП режим непрерывного тока обеспечивает малые пульсации входного (или выходного) тока и, как следствие, позволяет уменьшить пульсации напряжения на соответствующих конденсаторах, а при заданных значениях пульсации напряжения на конденсаторах — уменьшить их емкость, что влияет на мощность потерь, массу и габариты конденсаторов ИП. С другой стороны, уменьшать пульсацию тока в катушке можно за счет повышения ее индуктивности, что требует увеличения ее массы и габаритов, или же частоты коммутации, и тогда возрастает мощность потерь. При уменьшении индуктивности НКИ преобразователь переходит в граничный режим или в режим прерывистых токов, и сопровождается это снижением мощности потерь, массы и габаритов катушки. При этом уменьшаются и потери включения силовых ключей. Однако увели-

чивающаяся пульсация тока при заданных значениях пульсации напряжения требует увеличения емкости фильтрующих конденсаторов, что приведет к возрастанию их мощности потерь, а также массы и габаритов.

Таким образом, очевидно, что режим протекания тока в НКИ неоднозначно влияет на энергетические и массогабаритные показатели ИП и требует дополнительного анализа.

Известные методы позволяют анализировать влияние пульсации тока в НКИ на энергетические показатели ИП с помощью нормированной постоянной времени дросселя  $T_L$  [1] или коэффициента нагрузки  $\beta$  [2], которые учитывают соотношения значений индуктивности накопительной катушки, сопротивления нагрузки и частоты коммутации. Для определения режимов протекания тока в НКИ необходимо ввести в первом случае такой параметр, как относительная нормированная постоянная времени дросселя  $T_L^*$  (отношение  $T_L$  к постоянной времени дросселя для граничного режима  $T_{LC}$ ), а во втором — относительный коэффициент нагрузки  $\beta^*$  (отношение  $\beta$  к коэффициенту нагрузки для граничного режима  $\beta_C$ ). При этом зависимости пульсации тока в катушке индуктивности от предлагаемых коэффициентов носят нелинейный характер, к тому же для режимов непрерывного и пульсирующего тока они описываются различными выражениями, что усложняет проведение анализа.

В [3] предложен метод определения мощности потерь в силовых ключах ИП в зависимости от режима протекания тока в НКИ, при котором изменение пульсации тока описывается

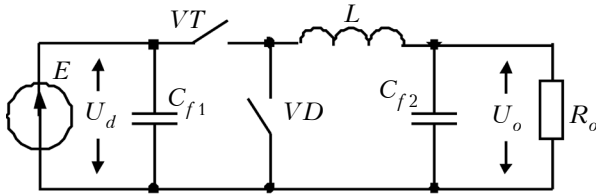


Рис. 1. Схема понижающего ИП

линейным и непрерывным законом благодаря использованию коэффициента  $K_{RL}$ :

$$K_{RL} = 0,5 \Delta I_L / I_{LAV}, \quad (1)$$

где  $I_{LAV}$ ,  $\Delta I_L$  — соответственно, среднее значение тока и размах пульсаций тока в НКИ,  $\Delta I_L = (I_{Lmax} - I_{Lmin})$ .

В случае когда  $0 < K_{RL} < 1$ , преобразователь работает в режиме непрерывного тока, при  $K_{RL} = 1$  — в граничном режиме, при  $K_{RL} > 1$  — в режиме прерывистого тока.

Для достаточно полного анализа энергоэффективности ИП необходимо также учитывать мощность потерь в пассивных элементах.

В данной работе предложен метод определения влияния пульсаций тока в накопительной катушке индуктивности и частоты коммутации на мощность потерь и массогабаритные показатели пассивных элементов ИП.

Рассмотрим предлагаемый метод на примере схемы ИП понижающего типа, приведенной на рис. 1. В соответствии с поставленной задачей необходимо проанализировать потери в НКИ  $L$  и в фильтрующих конденсаторах  $C_{f1}$  и  $C_{f2}$ , а также их массу (поскольку масса и габаритные размеры элементов связаны между). Для проведения исследований используем полученные в [3] аналитические выражения.

#### Мощность потерь и масса накопительной катушки индуктивности

Для упрощения расчета принимаем, что НКИ представляет собой катушку, намотанную на П-образный магнитопровод круглого сечения с воздушным зазором  $\delta$  (рис. 2).

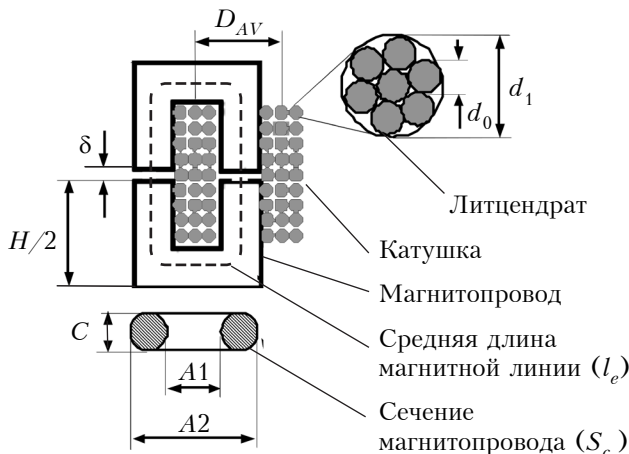


Рис. 2. Конструкция накопительной катушки индуктивности

Для пропорционального изменения геометрических размеров магнитопровода, например, через параметр  $A1$  введены следующие соотношения:

$$C = (A2 - A1) / 2, \quad (2)$$

$$K1 = A2 / A1, \quad (3)$$

$$K2 = H / C, \quad (4)$$

где  $A1$  — ширина окна магнитопровода;

$C, A2, H$  — диаметр, ширина и высота магнитопровода соответственно.

Необходимое значение размера  $A1$  определяется из условия ненасыщения магнитопровода при максимальном заполнении окна магнитопровода медью:

$$A1 = \left[ \frac{32 D U_d K_{nd} S_g}{\pi \Delta B f K2 (K1 - 1)^3} \right]^{1/4}, \quad (5)$$

где  $D$  — коэффициент заполнения импульсов управления;

$U_d$  — напряжение питания;

$K_{nd}$  — коэффициент неплотности намотки;

$S_g$  — площадь сечения литцендрата;

$f, \Delta B$  — частота и величина изменения магнитной индукции, для которых ведется расчет мощности потерь.

С учетом выражений (2) — (5) количество витков в обмотке катушки индуктивности определяется как

$$W = \left[ \frac{8 D U_d K2}{\pi \Delta B f K_{nd} S_g (K1 - 1)} \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Необходимый размер воздушного зазора  $\delta$ , при котором обеспечивается требуемое значение индуктивности НКИ  $L$  при заданных параметрах магнитопровода, можно определить из выражения [4, с. 86]

$$\delta = \frac{S_c W^2 \mu_0}{L} - \frac{l_e}{\mu}, \quad (7)$$

где  $S_c$  — площадь сечения магнитопровода;

$\mu_0, \mu$  — магнитная проницаемость вакуума и материала магнитопровода соответственно;

$l_e$  — длина средней магнитной линии.

Введение воздушного зазора в магнитопровод приводит к искривлению магнитного потока [4, с. 86], и тогда с учетом коэффициента краевой магнитной индукции  $F$ , который вычисляется по формуле

$$F = 1 + \frac{\delta}{\sqrt{S_c}} \ln \frac{2(H - 2C)}{\delta} \quad (8)$$

число витков в обмотке можно пересчитать, используя выражение

$$W = \left[ L \left( \delta + \frac{l_e}{\mu} \right) / (S_c \mu_0 F) \right]^{1/2}. \quad (9)$$

В схеме замещения катушки индуктивности на рис. 3 резистор  $R_0$  соответствует мощности потерь в магнитопроводе  $P_{core}$ , резисторы  $R_{c(AC)}$

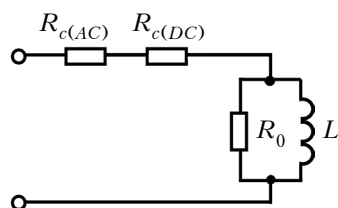


Рис. 3. Схема замещения катушки индуктивности

и  $R_{c(DC)}$  — мощностям потерь в обмотке  $P_{c(AC)}$  и  $P_{c(DC)}$ , зависящим, соответственно, от переменной и постоянной составляющих тока. Общая мощность потерь в НКИ будет равна их сумме:

$$P_L = P_{core} + P_{c(DC)} + P_{c(AC)}. \quad (10)$$

Мощность потерь в магнитопроводе можно определить из выражения [5]

$$P_{core} = P_0 V_{core} (f/f_n)^\alpha (\Delta B/B_n)^\beta, \quad (11)$$

где  $P_0$  — удельная мощность потерь в материале магнитопровода при частоте  $f_n$  и индукции  $B_n$  (значения  $f_n$  и  $B_n$  — нормированные);

$V_{core}$  — объем магнитопровода,  $V_{core} = S_c(l_e - \delta)$ ;

$\alpha, \beta$  — коэффициенты, характеризующие свойства материала магнитопровода.

Величина изменения магнитной индукции в магнитопроводе для режима непрерывного тока с учетом коэффициента пульсации тока в НКИ [6] определяется выражением

$$\Delta B = 2B_m K_{RL} / (1 + K_{RL}), \quad (12)$$

где  $B_m$  — максимальная магнитная индукция в магнитопроводе из условия ненасыщения,  $B_m = (0,5 \dots 0,75) B_{sat}$ ;

$B_{sat}$  — магнитная индукция насыщения.

Для граничного режима и режима прерывистого тока  $\Delta B = B_m$  [5].

С повышением частоты из-за скин-эффекта и эффекта близости в обмотке НКИ увеличивается мощность потерь, уменьшить которую можно, применяя литцендрат. Необходимую площадь сечения литцендрата для заданной плотности тока  $j$  находим как

$$S_1 = I_{LAV} / j. \quad (13)$$

Площадь сечения единичной жилы литцендрата находится с учетом толщины скин-слоя  $\delta_i$ :

$$S_0 = \pi \delta_i^2. \quad (14)$$

Толщина скин-слоя, в свою очередь, зависит от частоты, удельного сопротивления материала проводника (меди)  $\rho$  и его магнитной проницаемости  $\mu_r$ :

$$\delta_i = [\rho / (\pi f \mu_0 \mu_r)]^{1/2}. \quad (15)$$

Количество жил в литцендрате может быть найдено из выражения

$$N_S = S_1 / S_0. \quad (16)$$

Сопротивление постоянному току в литцендрате можно определить из выражения [7]

$$R_{c(DC)} = \frac{7a D_{AV} W \cdot 10^{-8}}{N_S d_0^2}, \quad (17)$$

где  $a$  — коэффициент, учитывающий удлинение жилы за счет скрутки;

$d_0 = 2\delta_i$  — диаметр единичной жилы.

Сопротивление переменному току в литцендрате можно определить из выражения [7]

$$R_{c(AC)} = R_{c(DC)} \left( F(z) + \left( \frac{e}{d_1^2} + \left( \frac{kW}{2D_c} \right)^2 \right) \times \right. \\ \left. \times d_0^2 N_S^2 G(z) \right), \quad (18)$$

где  $F(z), G(z)$  — коэффициенты, учитывающие скин-эффект и эффект близости;

$e$  — коэффициент, зависящий от количества жил в кабеле,  $e = 1,55 - 2$ ;

$k$  — коэффициент, зависящий от длины и среднего диаметра  $D_{AV}$  катушки;

$D_c$  — наружный диаметр катушки;

$d_1$  — диаметр литцендрата.

Значения коэффициентов  $F(z)$  и  $G(z)$  выражаются через функции Бесселя при помощи вспомогательной переменной  $z$  и определяются из справочных таблиц [7]. Значение  $z$  можно вычислить по формуле

$$z = 0,5 d_0 \sqrt{2\pi f \mu_a \sigma}, \quad (19)$$

где  $\mu_a$  — абсолютная магнитная проницаемость материала проводника;

$\sigma$  — удельная проводимость проводника.

Мощность потерь в литцендрате при постоянном и при переменном токе определяется из выражений

$$P_{c(DC)} = I_{LAV}^2 R_{c(DC)}, \quad (20)$$

$$P_{c(AC)} = I_{LRMS}^2 R_{c(AC)}, \quad (21)$$

где  $I_{LRMS}$  — среднеквадратичное значение тока, протекающего через НКИ, которое определяется из выражения

$$I_{LRMS} = \begin{cases} I_{LAV} \sqrt{(K_{RL}^2 + 3)/3} & \text{при } K_{RL} = [0 \dots 1], \\ I_{LAV} \sqrt{4K_{RL}/3} & \text{при } K_{RL} = [1 \dots \infty]. \end{cases} \quad (22)$$

Массу катушки индуктивности можно определить из выражения

$$m_L = V_{core} \rho_{core} + S_1 l \rho_c, \quad (23)$$

где  $\rho_c, \rho_{core}$  — плотность материала проводника и материала магнитопровода соответственно;  $l$  — длина литцендрата.



### Мощность потерь и масса конденсаторов

При проведении анализа принимаем, что пульсации входного ( $\Delta U_d$ ) и выходного ( $\Delta U_o$ ) напряжений постоянны.

Значения емкости входного ( $C_{f1}$ ) и выходного ( $C_{f2}$ ) фильтров могут быть определены из выражений

$$C_{f1} = \begin{cases} \frac{I_{LAV} D^2}{f \Delta U_d} & \text{при } K_{RL} = [0...1], \\ \frac{I_{LAV} D^2 K_{RL}}{f \Delta U_d} & \text{при } K_{RL} = [1... \infty], \end{cases} \quad (24)$$

$$C_{f2} = \frac{2I_{LAV} K_{RL}}{\sqrt{6} \pi f \Delta U_o}. \quad (25)$$

Изменение емкости фильтрующих конденсаторов происходит за счет параллельного подключения конденсаторов с нормированными значениями емкости  $C_n$ , сопротивления  $R_{Sn}$ ,  $R_{Dn}$  и массы  $m_n$ , взятыми из технической документации. В схеме замещения конденсатора на **рис. 4** сопротивление  $R_{Dn}$  соответствует потерям в диэлектрике, а сопротивление  $R_{Sn}$  — потерям в выводах и обкладках конденсатора.

Количество параллельно соединенных конденсаторов для входного ( $k_1$ ) и выходного ( $k_2$ )

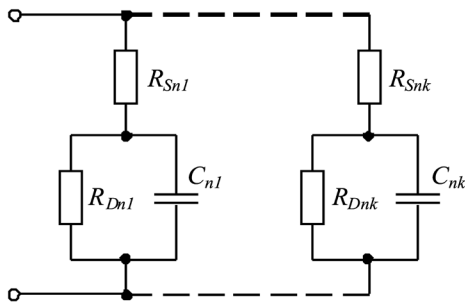


Рис. 4. Схема замещения конденсатора

фильтров определяется из выражений

$$k_1 = C_{f1}/C_n; \quad (26)$$

$$k_2 = C_{f2}/C_n. \quad (27)$$

Значения сопротивлений  $R_{S1}$  и  $R_{S2}$  можно определить по формулам

$$R_{S1} = R_{Sn}/k_1; \quad (28)$$

$$R_{S2} = R_{Sn}/k_2. \quad (29)$$

Мощность потерь во входном и выходном конденсаторах можно определить как сумму диэлектрических ( $P_D$ ) и резистивных ( $P_R$ ) потерь в них:

$$P_C = P_D + P_R. \quad (30)$$

Диэлектрические и резистивные потери во входном ( $P_{D1}$  и  $P_{R1}$ ) и выходном ( $P_{D2}$  и  $P_{R2}$ ) конденсаторах можно определить из выражений

$$P_{D1} = \Delta U_d^2 / R_D = \Delta U_d^2 \pi f C_{f1} \operatorname{tg} \delta; \quad (31)$$

$$P_{D2} = \Delta U_o^2 / R_D = \Delta U_o^2 \pi f C_{f2} \operatorname{tg} \delta; \quad (32)$$

$$P_{R1} = I_{Cf1 \text{ RMS}}^2 R_{S1}; \quad (33)$$

$$P_{R2} = I_{Cf2 \text{ RMS}}^2 R_{S2}, \quad (34)$$

где  $\operatorname{tg} \delta$  — коэффициент рассеяния в диэлектрике;

$I_{Cf1 \text{ RMS}}$ ,  $I_{Cf2 \text{ RMS}}$  — среднеквадратические значения тока входного и выходного конденсаторов соответственно.

Значение  $I_{Cf1 \text{ RMS}}$  можно определить из выражения [3]

$$I_{Cf1 \text{ RMS}} = \begin{cases} I_{LAV} \sqrt{D \frac{K_{RL}^2 + 3}{3}} & \text{при } K_{RL} = [0...1], \\ I_{LAV} K_{RL} \sqrt{4D/3} & \text{при } K_{RL} = [1... \infty]. \end{cases} \quad (35)$$

Для выходного конденсатора  $I_{Cf2 \text{ RMS}} = I_{L \text{ RMS}}$ .

Массу входного и выходного конденсаторов можно определить, соответственно, по формулам

$$m_{cf1} = k_1 m_n; \quad (36)$$

$$m_{cf2} = k_2 m_n. \quad (37)$$

### Результаты моделирования и их анализ

Расчеты по предложенной методике проводились в математической системе MathCAD. Были приняты следующие исходные параметры: напряжение источника питания  $U_d = 600$  В, напряжение нагрузки  $U_o = 380$  В и сопротивление нагрузки  $R_n = 6$  Ом. Для определения мощности потерь и массы магнитопровода использовались характеристики, взятые из технической документации на материал Kool Mμ фирмы Magnetics [8] с магнитной проницаемостью  $\mu = 26$ . Для определения мощности потерь и массы катушки использовались параметры литцендрата фирмы New England Wire [9], потерь и массы конденсаторов  $C_{f1}$  и  $C_{f2}$  — параметры конденсаторов серии E53 фирмы Electronicon [10].

Для удобства проведения анализа полученные результаты были представлены на рисунках в виде изолиний, соединяющих точки с одинаковыми относительными значениями исследуемых параметров в координатах  $(f, K_{RL})$ . Относительные величины получены, соответственно, делением мощности потерь в элементе на мощность нагрузки и массы элемента на максимальную суммарную массу пассивных элементов.

Как видно из **рис. 5**, увеличение частоты приводит к уменьшению потерь в медной обмотке (**рис. 5, а**) и к их возрастанию в магнитопроводе, особенно при  $K_{RL} < 1$ , т. е. в режиме непрерывного тока (**рис. 5, б**). Поэтому в исследуемом диапазоне изменения  $K_{RL}$  основной вклад в общие потери в катушке индуктивности в обла-

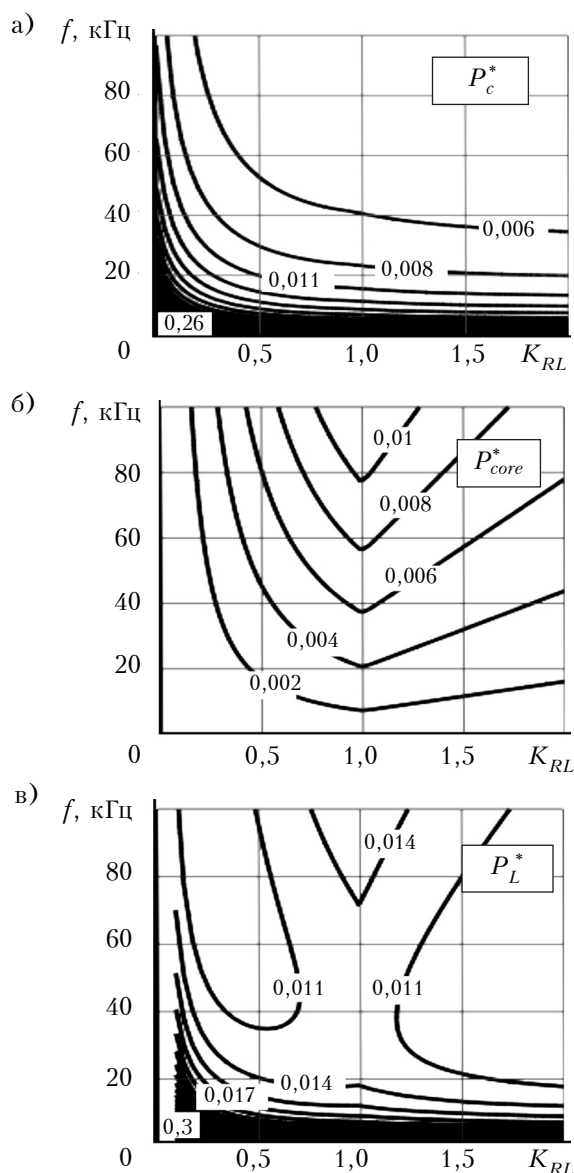


Рис. 5. Изолинии относительных потерь в литцендрате (а), в магнитопроводе (б), а также общих потерь в катушке индуктивности (в)

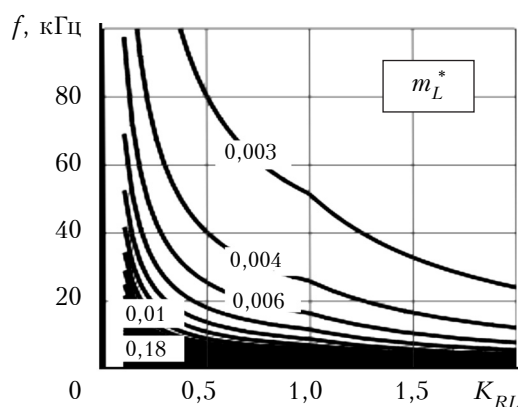


Рис. 6. Изолинии относительной массы катушки индуктивности

сти частот от 1 до 40 кГц вносят потери в медной обмотке, а при частотах от 40 до 100 кГц — потери в магнитопроводе.

Приведенные на рис. 5, в данные показывают, что и в режиме непрерывного ( $K_{RL}=0,01-0,7$ ), и в режиме прерывистого ( $K_{RL}=1,2-2$ ) тока имеются условия, при которых потери в НКИ минимальны.

Что касается массы катушки индуктивности, ее относительная величина нелинейно уменьшается как с ростом частоты, так и при увеличении коэффициента пульсаций (рис. 6).

Относительные потери во входном и выходном конденсаторах с ростом частоты коммутации увеличиваются во всем диапазоне изменения  $K_{RL}$  (рис. 7), причем потери во входном конденсаторе  $C_{f1}$  увеличиваются более интенсивно в режиме прерывистого тока ( $K_{RL}>1$ ), а в выходном конденсаторе  $C_{f2}$  — в режиме непрерывного тока ( $K_{RL}<1$ ).

С повышением частоты коммутации происходит уменьшение относительной массы обоих конденсаторов. Увеличение коэффициента пульсации приводит к уменьшению массы конденсатора  $C_{f1}$ , но только при  $K_{RL}>1$ , и к увеличению массы конденсатора  $C_{f2}$  во всем исследуемом диапазоне  $K_{RL}$  (рис. 8).

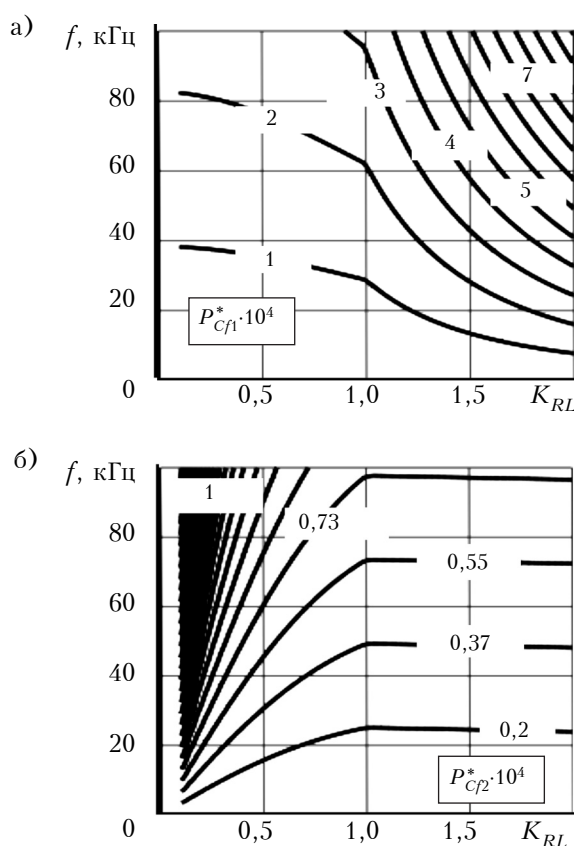


Рис. 7. Изолинии относительной мощности потерь во входном (а) и выходном (б) конденсаторах

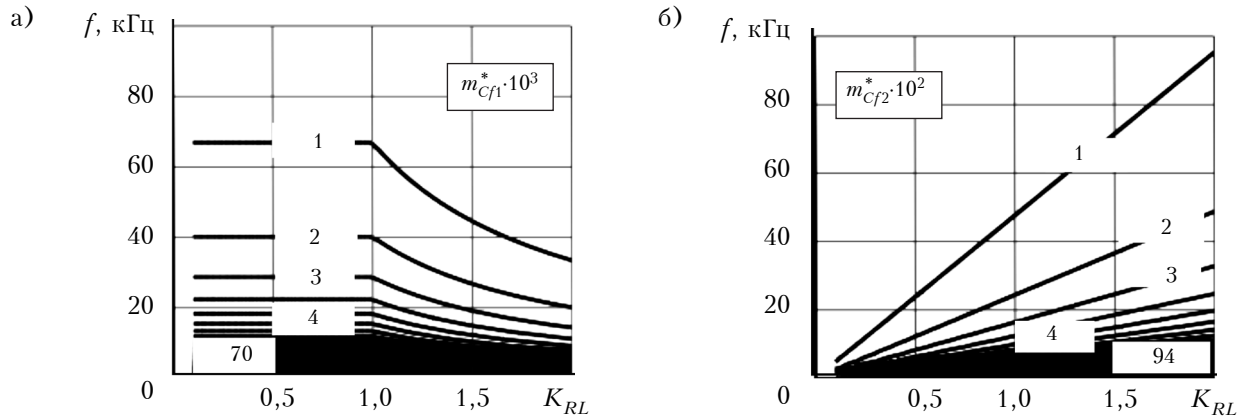


Рис. 8. Изолинии относительной массы входного (а) и выходного (б) конденсаторов

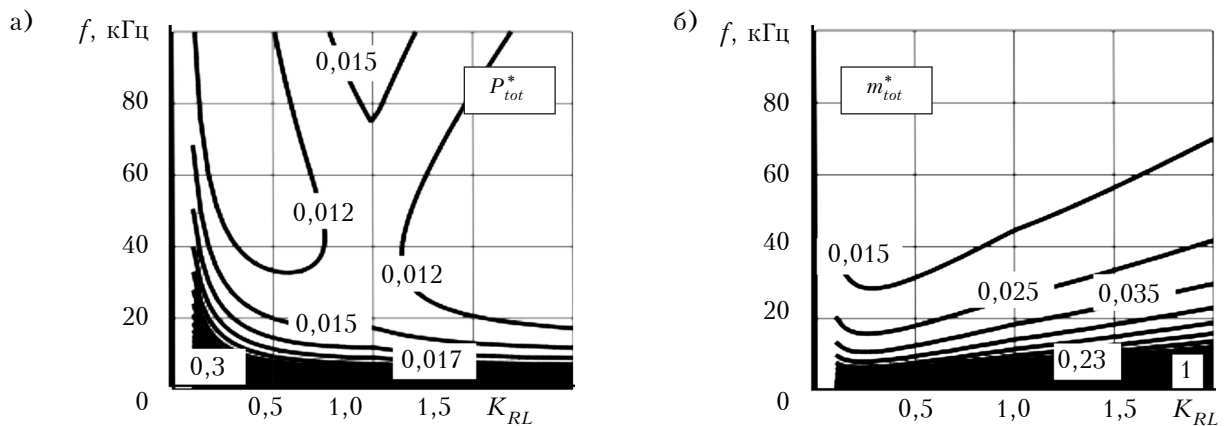


Рис. 9. Изолинии относительных значений суммарных потерь мощности пассивных элементов ИП (а) и их общей массы (б)

Результаты расчета относительных значений суммарных потерь мощности  $P_{tot}^*$  пассивных элементов ИП и их общей массы  $m_{tot}^*$  приведены на рис. 9. Сопоставляя данные на рис. 9, а и на рис. 5, б, можно сделать вывод, что суммарные потери определяются в основном потерями в накопительной катушке индуктивности.

Общая масса пассивных элементов, как и масса каждого из них в отдельности, с увеличением частоты уменьшается (рис. 9, б). При этом в диапазоне значений  $K_{RL}$  от 0 до 0,25 изменение  $m_{tot}^*$  определяется изменением массы катушки индуктивности (см. рис. 6). При  $K_{RL} > 0,25$  наблюдается увеличение общей массы за счет массы выходного конденсатора  $C_{p2}$  (см. рис. 8, б). Масса же входного конденсатора  $C_{f1}$  не оказывает существенного влияния на  $m_{tot}^*$ , т. к. при  $K_{RL} < 0,25$  она намного меньше массы НКИ, а при  $K_{RL} > 0,25$  — намного меньше массы конденсатора  $C_{p2}$ .

### Выводы

Приведем основные результаты проведенного анализа.

1. Мощность потерь в пассивных элементах импульсных преобразователей определяется в основном потерями в накопительной катушке индуктивности.

2. Минимальные потери в пассивных элементах ИП можно получить как в режиме непрерывного, так и в режиме прерывистого тока при определенном сочетании значений частоты коммутации и коэффициента пульсации.

3. При работе ИП в граничном режиме ( $K_{RL}=1$ ) наблюдается увеличение мощности потерь в пассивных элементах в диапазоне частот от 25 до 100 кГц за счет потерь в магнитопроводе.

4. Увеличение частоты приводит к снижению суммарной массы пассивных элементов. Для фиксированной частоты минимум суммарной массы пассивных элементов достигается в области значений коэффициента  $K_{RL} = 0,25$ .

Таким образом, разработанный метод позволяет определять значения коэффициента пульсации и частоты коммутации, обеспечивающие оптимизацию импульсных преобразователей по энергетическим и массогабаритным показателям.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Моин В. С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. — Москва: Энергоатомиздат, 1986. [Moin V. S. Stabilizirovannye tranzistornye preobrazovateli. Moskva: Energoatomizdat, 1986]

2. Северис Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. — Москва: Энергоатомиздат, 1988. [Severns R.,



Blum G. Impul'snye preobrazovateli postoyannogo napryazheniya dlya sistem vtorichnogo elektropitaniya. Moskva: Energoatomizdat, 1988]

3. Afanasyev O. M., Shcherba A. A. Method for determining energy losses in switched-mode converter power switches depending on storage inductor current modes // XXXIII International Scientific Conf. «Electronics and Nanotechnology». — Ukraine, Kyiv. — 2013. — P. 339–343.

4. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. — Москва: Техносфера, 2005. [Meleshin V. I. Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika. Moskva: Tekhnosfera, 2005]

5. Руденко Т. В., Руденко Ю. В. Оценка потерь энергии в магнитопроводе дросселя в импульсном стабилизаторе напряжения // Электроника и связь. — 2010. — № 1. — С. 89–91. [Rudenko T. V., Rudenko Yu. V. // Elektronika i svyaz'. 2010. N 1. P. 89]

6. Афанасьев А. М., Еремина А. В. Зависимость энергетических показателей силовых ключей импульсных преобразователей от коэффициента пульсации тока // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2012. — № 38. — С. 284–289. [Afanas'ev A. M., Eremina A. V. // Sbornik nauchnykh trudov DonGTU. 2012. N 38. P. 284]

7. Волгов В. А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. — Москва: Энергия, 1977. [Volgov V. A. Detali i uzly radioelektronnoi apparatury. Moskva: Energiya, 1977]

8. <http://www.mag-inc.com>

9. <http://www.litzwire.com>

10. <http://www.electronicon.com>

Дата поступления рукописи  
в редакцию 03.07 2013 г.

Afanasyev A. M., Eremina A. V. **Determination of power and weight-and-size parameters of passive components of pulsed converters.**

*Keywords: pulsed converter, passive components, power loss, mass and dimensions, current ripple factor, switching frequency.*

The paper presents a method for calculating the loss power and weight of passive elements of pulsed converters (PC) depending on the coefficient of the current ripple in the storage inductor and the frequency of switching. The method allows to optimize power and weight-and-size parameters, as well as the PC modes. The curves obtained using the proposed method are presented. The analysis of these curves allows to determine the conditions for minimum loss power and weight of passive components of PCs.

Ukraine, Alchevsk, Donbass State Technical University.

Афанасьєв О. М., Єрьоміна А. В. **Визначення енергетичних і масогабаритних показників пасивних елементів імпульсних перетворювачів.**

*Ключові слова: імпульсний перетворювач, пасивні елементи, потужність втрат, масогабаритні показники, коефіцієнт пульсації струму, частота комутації.*

Запропоновано метод розрахунку потужності втрат і маси пасивних елементів імпульсних перетворювачів (ІП) залежно від коефіцієнта пульсації струму в накопичувальній котушці індуктивності і від частоти комутації. Метод дозволяє проводити оптимізацію енергетичних і масогабаритних показників, а також режимів роботи ІП. Наведено графічні залежності, отримані при використанні запропонованого методу, аналіз яких дозволив визначити умови для отримання мінімальної потужності втрат і маси пасивних елементів ВП.

Україна, м. Алчевськ, Донбаський державний технічний університет.

## НОВЫЕ КНИГИ

### НОВЫЕ КНИГИ

**Многoproцессорные системы на одном кристалле. Разработка аппаратных средств и интеграция инструментов / Под ред. М. Хюбнера, Ю. Бекера. — Москва: Техносфера, 2012.**

Книга представляет собой новейший обзор по системному проектированию с использованием архитектур многoproцессорных систем на одном кристалле (multiprocessor system-on-chip, MPSoC). В данном издании рассматриваются такие ключевые вопросы, как интеграция реконфигурируемого аппаратного обеспечения, физическое проектирование многoproцессорных систем, разработка инструментов и приложений.



УДК 621.315.592

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, д. т. н. И. П. ОСТРОВСКИЙ, к. т. н. Ю. Н. ХОВЕРКО,  
к. т. н. С. И. НИЧКАЛО, Е. И. БЕРЕЖАНСКИЙ

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

## СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ С ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ СИГНАЛА

*Разработана система измерения индукции магнитного поля и температуры с использованием нитевидных кристаллов кремния  $p$ -типа проводимости в качестве первичных преобразователей. Система позволяет в интервале 4,2–77 К производить измерения и магнитного поля, и температуры, а в интервале 100–300 К измерять температуру при воздействии магнитных полей. Такая система пригодна для преобразования малых сигналов, для чего используется усилитель с программируемым коэффициентом усиления и аналого-цифровой преобразователь с высокой разрешающей способностью.*

*Ключевые слова:* нитевидные кристаллы, кремний, датчик, температура, давление.

В настоящее время существует большое количество измерительных систем на основе датчиков физических величин, в том числе multifunctionальных, т. е. датчиков, которые одновременно измеряют два и более параметров, например сенсор деформации и температуры, температуры и магнитного поля и др. [1–4]. Однако такие системы имеют ряд существенных недостатков, среди которых следует отметить высокую стоимость как отдельных составляющих частей, так и системы в целом; большое количество функциональных блоков, что затрудняет эксплуатацию измерительной системы; недостаточную стабильность и воспроизводимость характеристик. Следовательно, важной задачей является разработка и создание новых систем, которые были бы лишены указанных недостатков. В [4] нами были рассмотрены физические основы создания датчика магнитного поля и температуры на базе нитевидных кристаллов Si–Ge, работоспособного в ограниченном интервале температур 4,2–77 К. Настоящая работа посвящена дальнейшему развитию концепции создания multifunctionальных датчиков физических величин, работоспособных в широком интервале температур 4,2–300 К, а также разработке системы измерения индукции магнитного поля и температуры с использованием нитевидных кристаллов Si  $p$ -типа проводимости в качестве первичных преобразователей.

Среди основных требований, предъявляемых к современным сенсорным приборам, можно отметить multifunctionальность, высокую точность преобразования, термостабильность, простоту использования, минимальное энергопотребление при возможности функционирования с низковольтными источниками питания, возмож-

ность объединения в сеть и т. д. Обычно первичные преобразователи генерируют очень слабые сигналы, которые должны обрабатываться оптимизированными интерфейсными схемами для обеспечения адекватного усиления без внесения шумов, ухудшающих точность измерений. Зачастую датчики размещаются вдали от схем цифровой обработки, при этом разработчик сталкивается с требованиями обеспечения защиты от электромагнитных помех, гальванической изоляции и малого потребления энергии. Кроме требований к тракту прохождения сигнала иногда предъявляют также жесткие требования к питанию, коммуникационным интерфейсам (между приборами и системами) и к защите информации при передаче данных. Обеспечение необходимых требований определяется структурными и схемотехническими решениями, развитие которых сегодня актуально [5–7].

Разработанная измерительная система, блок-схема которой представлена на **рис. 1**, состоит из первичного преобразователя (чувствительного элемента-сенсора) и схемы предварительной обработки сигнала и передачи данных.

Исследования электрофизических свойств нитевидных кристаллов кремния  $p$ -типа проводимости, используемых в качестве первичных преобразователей измерительной системы, показали, что в интервале 4,2–300 К температурная зависимость сопротивления линейна в двух диапазонах — от 4,2 до 80 К и от 100 до 300 К (**рис. 2**). Поэтому такие образцы можно использовать для достаточно широкого рабочего диапазона температур. Температурный коэффициент сопротивления (**ТКС**) таких образцов в интервале 4,2–80 К составляет  $135\% \cdot K^{-1}$ , а в интервале 100–300 К — около  $0,4\% \cdot K^{-1}$ . В свою оче-

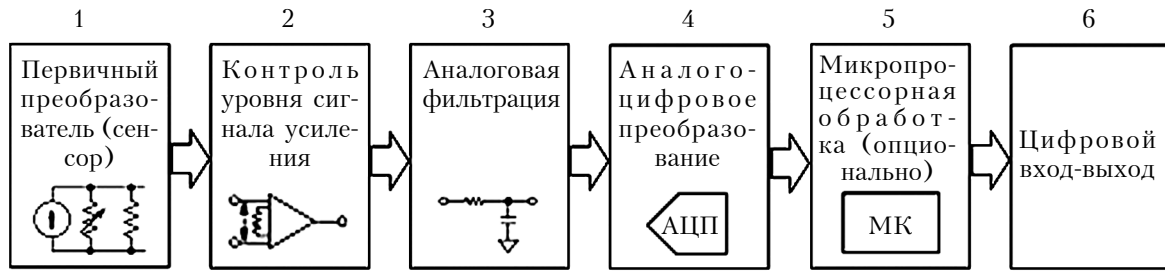


Рис 1. Блок-схема измерительной системы:

1 — преобразователь/мост; 2 — аналоговый интерфейс; 3 — блок фильтрации; 4 — блок АЦП; 5 — блок цифровой обработки; 6 — блок коммутации

редь, полевая зависимость сопротивления (магнетосопротивление) также линейна для магнитных полей до 14 Тл (рис. 3). Это позволило создать многофункциональный сенсор магнитного поля и температуры с последующей интеграцией в автоматизированную измерительную систему.

Конструктивно первичный преобразователь такого многофункционального сенсора состоит из двух одинаковых чувствительных элементов, расположенных перпендикулярно друг другу. Первый чувствительный элемент измеряет только температуру и нечувствителен к магнитному полю, поскольку его продольное магнетосопротивление практически равно нулю, а второй — чувствителен и к температуре, и к магнитному полю. Чувствительность такого датчика к магнитному полю составляет 0,1–0,2 Тл<sup>-1</sup> при температуре 4,2 К.

Таким образом, терморезисторы на основе сильно легированных НК *p*-Si могут использоваться в широком диапазоне температур 4,2–300 К, однако их чувствительность значительно меньше, чем в кристаллах с более низким уровнем легирования.

В этом диапазоне температурные зависимости сопротивления НК *p*-Si описываются следующими уравнениями:

— в интервале 4,2–80 К

$$R(T) = A_1 - B_1 T - C_1 T^2 + D_1 T^3, \quad (1)$$

— в интервале 100–300 К

$$R(T) = A_2 - B_2 T + C_2 T^2 - D_2 T^3, \quad (2)$$

где  $A_1 = 8,29137$  Ом;  $B_1 = 0,01695$  Ом·К<sup>-1</sup>;

$$C_1 = 0,00154 \text{ Ом} \cdot \text{К}^{-2}; D_1 = 1,46073 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{К}^{-3};$$

$$A_2 = 32895,79405 \text{ Ом} \cdot \text{К}; B_2 = 337,99842 \text{ Ом} \cdot \text{К}^{-1};$$

$$C_2 = 2,44916 \text{ Ом} \cdot \text{К}^{-2}; D_2 = 0,00351 \text{ Ом} \cdot \text{К}^{-3}.$$

Следует отметить, что в системе должно быть предусмотрено измерение достаточно малых величин. Как видно из рис. 2, при увеличении температуры сопротивление образцов падает, а следовательно, уменьшается и магнетосопротивление, что подтверждается рис. 3.

Анализ исходных характеристик предлагаемого сенсора показал, что в исследуемом температурном интервале необходимо производить температурную коррекцию выходного сигнала датчика, используя схемотехнические решения, и таким образом повышать надежность и стабильность функционирования системы.

Рабочий диапазон измерений можно расширить, используя компенсационные методы обработки выходных сигналов за счет введения программных алгоритмов аппроксимации.

Уменьшить погрешность измерения индукции магнитного поля можно, проводя температурную коррекцию сигналов путем введения поправочных алгоритмов.

Система построена по принципу «входной сигнал — обработка — выходной сигнал» (Input — Process — Output (IPO) Model), который сейчас широко используется в различных измерительных системах. Это позволяет повысить качественные показатели подобных систем в целом и добиться гибкости функционирования и легкости обращения с системой конечного потребителя.

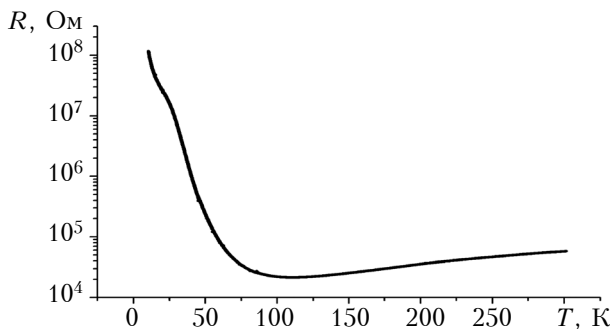


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления образцов НК Si

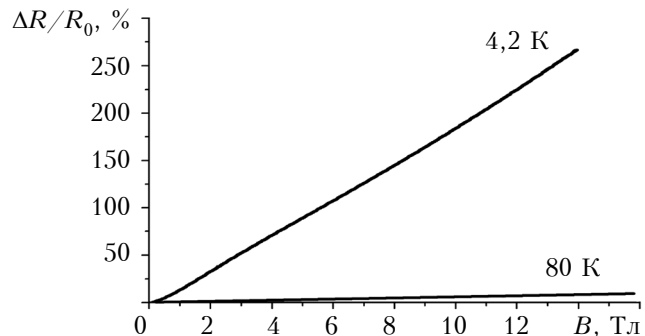


Рис. 3. Магнетосопротивление образцов НК Si при фиксированных температурах

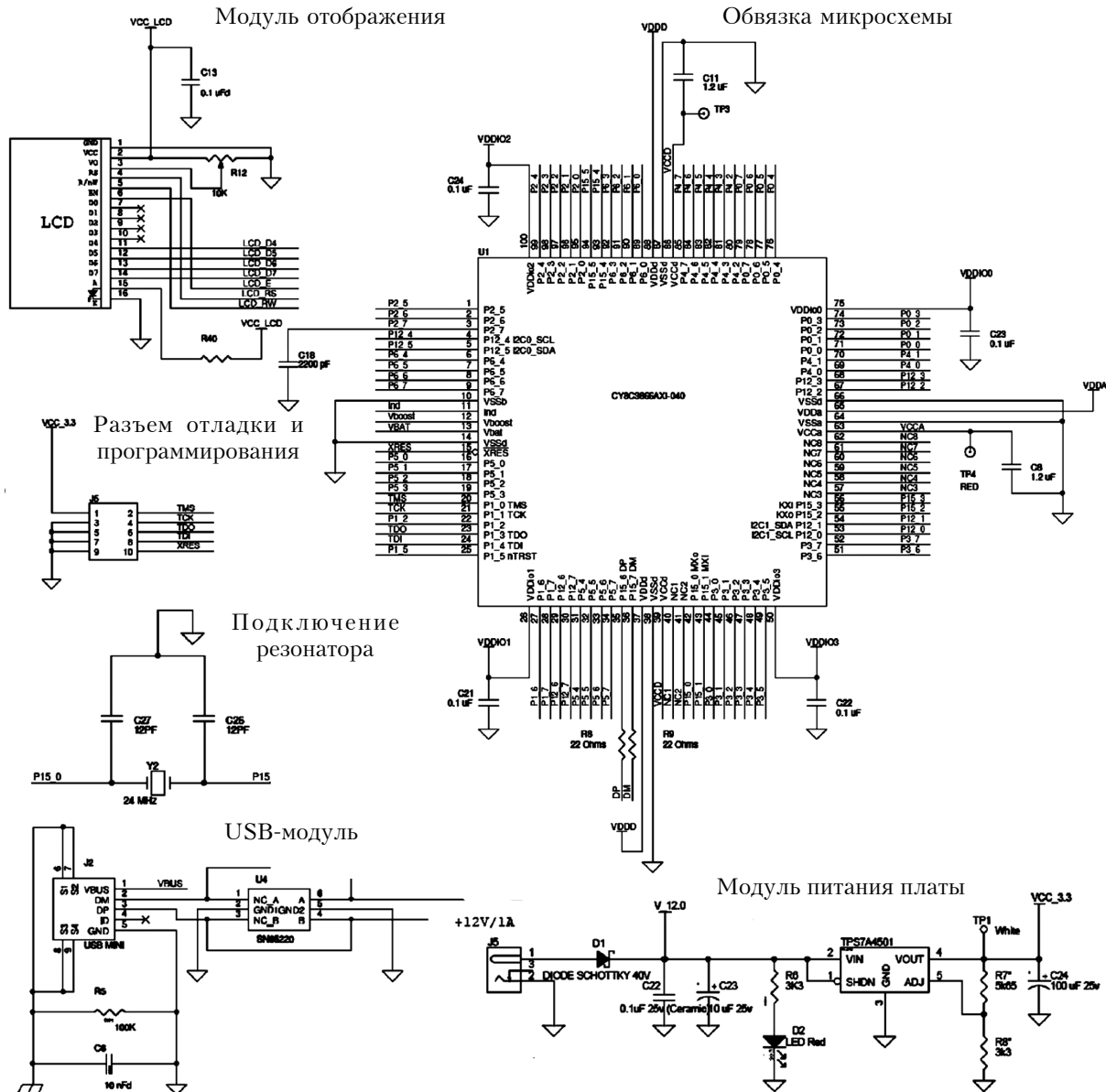


Рис. 4. Электрическая схема измерительной системы

В данном измерительном устройстве использовано основное преимущество цифровой техники в процессе обработки данных — это сравнительно простая реализация операций высокого уровня, которые сложно осуществить аналоговыми устройствами. К таким операциям относятся подавление шумов, усиление, цифровая фильтрация и нелинейная обработка сигнала. При этом функциональная нагрузка на чувствительный элемент датчика уменьшается и снижаются требования к характеристикам элемента. Кроме того, благодаря цифровой обработке становится возможным измерение достаточно малых величин. Разработанная нами измерительная система позволяет измерять индукцию магнитного поля и температуру с точностью 3 мТл и  $\pm 0,1$  К соответственно.

В качестве схемы обработки использована программируемая система на кристалле PSoC3 (Programmable System-on-Chip) корпорации

Cypress. Выбор данного микроконтроллера в качестве базового элемента системы был обусловлен, прежде всего, наличием, кроме микропроцессорного ядра, массива интегрированной аналоговой и цифровой периферии, сконфигурированной для работы со смешанными сигналами. Микроконтроллер выполнен в виде матрицы программируемых универсальных цифровых блоков (рис. 4). В частности, согласно приведенной на рис. 1 блок-схеме, на рис. 4 отображены структурные элементы 4, 5 и 6. Интеграция всей системы на одном кристалле позволяет снизить потребление энергии за счет уменьшения питающих напряжений и токов. Это важно для приборов, требующих низкого энергопотребления, а также для миниатюризации устройств с питанием от автономных источников энергии, что позволяет повысить надежность схемы по сравнению с набором отдельных блоков на микросхемах с той же функциональностью. Меньшее ко-



личество составляющих упростило также компоновку и монтаж готового изделия.

Для коммутации сенсора с основной измерительной платой использована плата усиления и фильтрации, выполненная отдельно на дискретных компонентах. Конфигурация микропроцессора производилась путем использования специализированного программного обеспечения, что позволяло быстро составлять систему из необходимых функциональных блоков, например дельта-сигма-АЦП. Алгоритм обработки и коррекции базируется на использовании поправочных коэффициентов с учетом разных диапазонов измерения. В настоящей статье программный код не приведен из-за большого объема и специфики задачи.

\*\*\*

Таким образом, разработанные авторами сенсоров на основе нитевидных кристаллов  $p$ -Si позволили создать систему для измерения индукции магнитного поля и температуры в диапазонах 4,2–77 и 100–300 К. Температурная коррекция выходных сигналов в такой системе обеспечивается вторичным преобразователем, осуществляющим программную обработку цифровых сигналов. Система пригодна для преобразования малых сигналов, для чего используется усилитель с программируемым коэффициентом усиления и аналого-цифровой преобразователь с высокой разрешающей способностью.

В системе учтены основные особенности сопряжения сенсоров на основе нитевидных кристаллов кремния  $p$ -типа с микроконтроллерами. Установлено, что использование программируемых систем на кристалле для обработки информации в сенсорных устройствах является перспективным. В разработанной системе обработки информации разрешающая способность сенсоров на базе нитевидных кристаллов по магнитному полю достигла 3 мТл, а рассеиваемая мощность системы уменьшилась за счет использования специализированной ИС.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лепіх Я. І., Гордієнко Ю. О., Дзядевич С. В. та ін. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем. — Одеса: Астропринт, 2010. [Lepikh Ya. I., Gordiyenko Yu. O., Dzyadevich S. V. ta in. Stvorenniya mikroelektronnikh datchikiv novogo pokolinniya dlya intelektual'nikh sistem. — Odessa: Astroprint, 2010]
2. Лепіх Я. І., Гордієнко Ю. О., Дзядевич С. В. та ін. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління. — Одеса: Астропринт, 2011. [Lepikh Ya. I., Gordiyenko Yu. O., Dzyadevich S. V. ta in. Intelektual'ni vimiryuvальni sistemi na osnovi mikroelektronnikh datchikiv novogo pokolinniya. — Odessa: Astroprint, 2011]
3. Викулина Л. Ф., Глауберман М. А. Физика сенсоров температуры и магнитного поля. — Одесса: Маяк, 2000. [Vikulina L. F., Glauberman M. A. Fizika sensorov temperatury i magnitnogo polya. — Odessa: Mayak, 2000]
4. Дружинин А. А., Островский И. П., Ховерко Ю. Н. и др. Нанокристаллы  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  в роли чувствительных элементов сенсора магнитного поля и температуры // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 5. — С. 19–21. [Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P.,

Khoverko Yu. N. i dr. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. 2012. N 5. P. 19]

5. Дружинін А. О., Островський І. П., Когут Ю. Р. Ниткоподібні кристали кремнію, германію та їх твердих розчинів в сенсорній електроніці. — Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка», 2010. [Druzhinin A. O., Ostrovskii I. P., Kogut Yu. R. Nitkopodibni kristali kremniyu, germaniyu ta yikh tverdikh rozchiniv v sensornii elektronitsi. — L'viv: Vid. NU «L'viv's'ka politekhnikha», 2010]

6. Druzhinin A. A., Khoverko Yu. N., Ostrovskiy I. P. et al. Remote control measuring system based on strain sensors // Computational Problems of Electrical Engineering. — 2012. — Vol. 2, N 1. — P. 11–14.

7. Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С. Тензорезистивні сенсори тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. — 2012. — Т. 3, № 9 (3). — С. 16–24. [Druzhinin A. O., Mar'yamova I. I., Kutrakov O. P., Lyakh-Kagui N. S. // Sensorna elektronika ta mikrosistemni tekhnologiyi. — 2012. — Vol. 3, N 9 (3). — P. 16]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 27.05 2013 г.

Druzhinin A. A., Ostrovskiy I. P., Khoverko Yu. N., Nichkalo S. I., Berezhanskyi E. I. **Measuring system for magnetic field and temperature with digital signal processing.**

**Keywords:** whiskers, silicon, sensor, temperature, pressure.

The measuring system for the magnetic field and temperature using silicon whiskers  $p$ -type conductivity as a primary device has been developed. The developed system allows the measurement of the magnetic field and temperature in the temperature range 4,2–77 K, as well as to measure the temperature under the influence of magnetic fields in the range of 100–300 K. It is shown that this system is suitable for the conversion of small signals using a programmable gain amplifier and analog-to-digital converter with high resolution.

Ukraine, Lviv Polytechnic National University.

Дружинін А. О., Островський І. П., Ховерко Ю. М., Нічкало С. І., Бережанський Є. І. **Система вимірювання магнітного поля і температури з цифровою обробкою сигналу.**

**Ключові слова:** ниткоподібні кристали, кремній, датчик, температура, тиск.

Розроблено систему вимірювання індукції магнітного поля і температури з використанням ниткоподібних кристалів кремнію  $p$ -типу провідності як первинних перетворювачів. Система дозволяє в інтервалі 4,2–77 К проводити вимірювання і магнітного поля, і температури, а в інтервалі 100–300 К вимірювати температуру при впливі магнітних полів. Така система придатна для перетворення малих сигналів, для чого використовується підсилювач з програмованим коефіцієнтом посилення і аналого-цифровий перетворювач з високою роздільною здатністю.

Україна, Національний університет «Львівська політехніка».

УДК 621.3.049.776

Д. т. н. В. Г. СПИРИН

Россия, Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ

E-mail: spv149@mail.ru

## МИКРОСБОРКА НА КРЕМНИЕВОЙ ПЛАТЕ ДЛЯ АКСЕЛЕРОМЕТРА

*Рассмотрена конструкция и технология микросборки для акселерометра, выполненной на кремниевой плате с тремя уровнями коммутации и тонкопленочными резисторами на обеих ее поверхностях.*

*Ключевые слова: многоуровневая плата, тонкопленочная микросборка.*

В современных акселерометрах конструкция электронного преобразователя представляет собой металлическую пластину, на противоположных поверхностях которой установлены ситалловые платы с компонентами. Одна из плат функционально является генератором, другая — усилителем. Для того чтобы исключить воздействие помех со стороны генератора на усилитель, общие шины каждой платы соединяют с металлической пластиной проволочными перемычками [1]. Недостатками этой конструкции микросборки (МСБ) являются большие габариты и масса. Поскольку акселерометры широко применяются в летательных аппаратах, где задаются жесткие требования по массе и габаритам в целом, габариты и массу МСБ нужно существенно уменьшить. Это можно сделать, если плату выполнить на кремнии и использовать ее в качестве несущей конструкции.

Считается, что монокристаллический кремний является довольно хрупким материалом, не поддающимся пластической деформации, как большинство металлов. Однако он не такой хрупкий, как это может показаться. Ошибочное представление о его хрупкости появилось из-за того, что при освоении полупроводниковой технологии кремний формировался в виде пластин диаметром 5—13 см и толщиной 250—500 мкм. Даже листы из нержавеющей стали таких габаритов легко поддаются необратимой (пластической) деформации [2, с. 546]. Модуль Юнга кремния ( $1,9 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>) сравним с модулем Юнга нержавеющей стали и выше, чем коэффициент упругости кварца и большинства стекол. Это указывает на то, что монокристаллический кремний может быть использован в качестве несущей конструкции при условии уменьшения размеров пластин. Возможность создания тонкопленочных МСБ на подложках из кремния рассматривалась в [3, 4]. Однако приведенные в этих статьях материалы носят общий характер и нуждаются в уточнении.

Существует еще одно обстоятельство, которое ограничивает применение кремниевых подложек в тонкопленочных МСБ. Традиционно в России в качестве резистивных материалов в МСБ используются резистивные сплавы (например, РС-3710) или керметы (например, К-50С). Для их обработки применяют сильные травители, в состав которых, как правило, входит плавиковая кислота, растворяющая диоксид кремния. Альтернативным вариантом травления указанных резистивных материалов является «сухое» травление. Однако оно не получило широкого распространения на Российских предприятиях, и это тоже сдерживает применение кремниевых подложек в тонкопленочных МСБ.

Целью настоящей работы являлась разработка основных элементов конструкции и технологии изготовления микросборки на кремниевой плате с высокой плотностью упаковки, которая используется в качестве электронного преобразователя для акселерометра.

Учитывая высокую прочность кремния, плату на его основе можно использовать как несущую конструкцию. В этом случае на обеих сторонах подложки формируют хотя бы по одному уровню коммутации, причем не всегда нужно выполнять сквозные переходные отверстия. В данной конструкции функционально законченные узлы располагают на противоположных поверхностях платы с минимальными связями между ними, которые при необходимости можно соединить между собой с помощью проволочных перемычек или гибких шлейфов.

В случае применения низкоомного кремния (с удельным сопротивлением менее 0,01 Ом·см) общую шину можно выполнить на самом кремнии, получив таким образом три уровня коммутации. Для этого перед напылением проводящей структуры в диоксиде кремния вскрывают окна и путем напыления многослойных тонких проводящих пленок обеспечивают контакт металлизации с кремнием. Коммутация, сформирован-

ная из многослойных пленок, имеет повышенную надежность и обеспечивает омический контакт к кремнию любого типа проводимости в широком диапазоне концентрации легирующих примесей  $n$ - или  $p$ -типа ( $10^{17} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ) [5, с. 76].

На платы с тремя уровнями коммутации возможна двусторонняя установка компонентов, выводы которых присоединяются как пайкой, так и сваркой. Технологические процессы по формированию рисунка таких плат хорошо отработаны. В качестве примера рассмотрим конструкцию платы, выводы компонентов к которой присоединяются сваркой (рис. 1). Особенностью данного конструктивно-технологического варианта является формирование проводников общей шины как на поверхности кремния, так и на поверхности оксида кремния. Учитывая, что толщина диэлектрика составляет 4–5 мкм, соединение проводников общей шины, расположенных в разных уровнях, становится проблематичным ввиду возможного обрыва проводников на ступеньках диэлектрика. Поэтому соединение этих проводников производится с помощью золотой или алюминиевой проволоочной перемычки. К проводникам общей шины, формируемым на диэлектрике, подключаются тонкопленочные элементы, например резисторы, а к проводникам и контактным площадкам (КП) общей шины, формируемым на кремнии, присоединяются выводы компонентов и периферийные КП.

Если все компоненты или их часть имеют выводы, присоединяемые пайкой, то применяют

способы соединения проводников общей шины, расположенных в разных уровнях, по технологиям, описанным в [6].

Для уменьшения падения напряжения на кремнии проводники 5 и 6 общей шины, расположенные на одной поверхности (см. рис. 1), делают максимально длинными и располагают на минимальном расстоянии друг от друга. Проводники 6 и 7 общей шины, расположенные на разных поверхностях кремниевой платы, должны иметь максимальную площадь перекрытия.

Экранирование компонентов высокочастотных цепей является обязательным. Для улучшения экранирования всю незазанятую тонкопленочными элементами поверхность кремния металлизировать. Металлизация под компонентами не нарушит надежность работы конструкции, т. к. на обе поверхности платы наносится защитная изоляция толщиной 20–30 мкм, которая предотвращает замыкание корпуса или кристалла компонента на металлизацию, расположенную под ним.

При конструировании топологии платы необходимо учитывать, что между проводниками и общей шиной ввиду малой толщины слоя диоксида кремния образуется значительная емкость: при толщине диоксида кремния 4 мкм удельная емкость составляет 7–10 пФ/мм<sup>2</sup>. В связи с этим сигнальные проводники в высокочастотных цепях должны иметь минимальную площадь для уменьшения времени задержки. Для шин питания увеличение удельной емкости, наоборот, является благоприятным фактором, и они могут быть выполнены с большой площадью.

В таблице приведена краткая технологическая схема изготовления платы вышеописанной

Последовательность технологических операций изготовления трехуровневой платы

Операция	Толщина слоя, мкм
Термическое окисление кремния во влажном кислороде	1,5–2,0
Ионно-плазменное напыление оксида кремния	2,5–3,0
Двусторонняя фотолитография. Травление оксида кремния в отверстиях. Удаление фоторезиста	—
Двустороннее напыление проводящей структуры Cr–Al	1,0–1,5
Двусторонняя фотолитография и травление алюминия. Удаление фоторезиста	—
Двусторонняя фотолитография и травление хрома. Удаление фоторезиста	—
Двустороннее нанесение и формирование защитной изоляции	20–30
Разделение пластин на платы	—

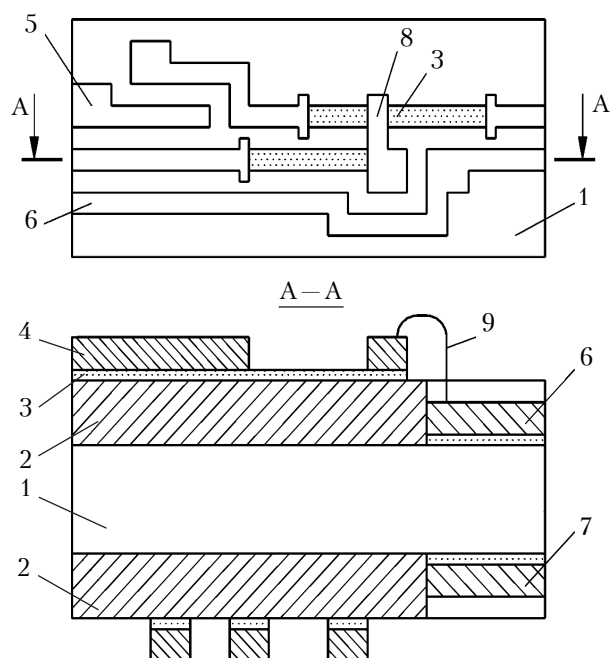


Рис. 1. Конструкция кремниевой платы с тремя уровнями коммутации:

1 — подложка; 2 — диоксид кремния; 3 — слой хрома; 4 — слой алюминия; 5–7 — проводники общей шины на кремнии; 8 — проводник общей шины на диоксиде кремния; 9 — проволоочная перемычка

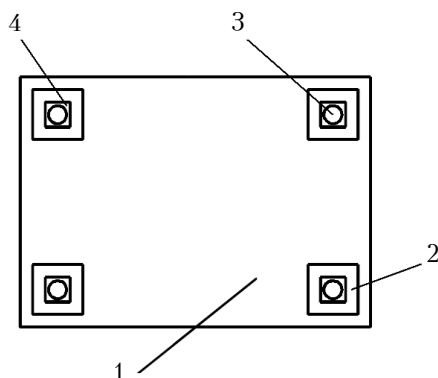


Рис. 2. Крепление платы к основанию с помощью проволоки:  
1 — плата; 2 — КП; 3 — стержень; 4 — отверстие

конструкции. В качестве материалов адгезионного слоя могут быть использованы такие материалы, как титан, молибден, хром. В данной технологии применен хром с удельным поверхностным сопротивлением  $\rho=250-500 \text{ Ом}/\square$ , который является уникальным материалом, т. к. его можно использовать одновременно и в качестве резистивного слоя. Такое решение несколько увеличивает площадь тонкопленочных резисторов (ТПР), однако при этом можно значительно снизить себестоимость МСБ за счет исключения напыления резистивного материала, который, как правило, наносится в отдельном технологическом цикле перед напылением проводящего слоя. Как известно, травление хрома производится серной или соляной кислотой, к которым устойчив диоксид кремния. Стабильность сопротивления резистора из пленки хрома практически не уступает стабильности ТПР из резистивных сплавов [7].

Если на противоположных сторонах платы расположить разные функциональные узлы, причем один из них будет являться генератором помех для другого, то общая шина на кремнии будет выполнять функцию экрана.

Учитывая, что удельная мощность рассеяния таких устройств не превышает  $2 \text{ Вт}/\text{см}^2$ , крепление платы к основанию МСБ можно осуществить двумя способами.

При креплении платы к основанию с помощью проволоки один конец проволочного луженного стержня присоединяется к основанию из ковара, например, методом пайки в глухое отверстие, а другой конец стержня вставляется в крепежное металлизированное отверстие платы и запаивается (рис. 2). Лучше всего применять медную проволоку из мягкой отожженной меди, которая будет легко деформироваться при значительных изменениях температуры. В этом случае кроме крепления платы проволока также будет выполнять роль теплоотвода. Очевидно, что данный метод монтажа может применяться для плат небольшого размера и с невысокой мощностью рассеивания.

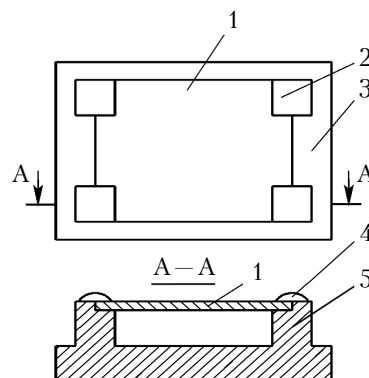


Рис. 3. Крепление платы к основанию методом пайки ее контактных площадок:  
1 — плата; 2 — КП; 3 — основание; 4 — припой; 5 — выступ

Крепление платы к основанию МСБ можно осуществить также методом пайки ее контактных площадок (рис. 3). В выступе основания из ковара делается вырез, глубина которого равна толщине платы. Плату помещают в углубления выступа и расплавляют ее КП к предварительно облуженным поверхностям выступа.

\*\*\*

Практика проектирования электронного преобразователя для акселерометра в виде кремниевой платы с тремя уровнями коммутации, которая содержит тонкопленочные резисторы на обеих поверхностях, показывает, что конструкция электронного преобразователя уменьшается в 2–3 раза по сравнению с прототипом, за счет исключения одной ситалловой платы и металлического основания. Объем разработанной МСБ —  $0,13 \text{ см}^3$ , плотность упаковки по сравнению с прототипом возросла в 6,67 раза, в основном за счет уменьшения толщины МСБ.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Спирин В. Г. Особенности проектирования электронных преобразователей датчиков первичной информации // Тр. Российского науч.-технич. общества радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова. Серия: Научная сессия, посвященная дню Радио. — 2005. — Вып. 60–2. — С. 71–75. [Spirin V. G. // Tr. Rossiiskogo nauch.-tekhnich. obshchestva radiotekhniki, elektroniki i svyazi im. A. S. Popova. Seriya: Nauchnaya sessiya, posvyashchennaya dnyu Radio. 2005. Iss. 60–2. P. 71]
2. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. — Москва: Техносфера, 2005. [Fraiden Dzh. Sovremennye datchiki. Spravochnik. — Moskva: Tekhnosfera, 2005]
3. Черный А., Черный Б. Проблемы разработки и производства многокристалльных модулей // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. — 2008. — № 3. — С. 40–43. [Chernyi A., Chernyi B. // Elektronika: Nauka. Tekhnologiya. Biznes. 2008. N 3. P. 40]
4. Спирин В. Г. Конструкторско-технологические варианты коммутационных плат с подложкой из кремния // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2005. — № 1. — С. 48–50. [Spirin V. G. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. 2005. N 1. P. 48]
5. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. — Москва: Радио



и связь, 1989. [Koledov L. A. Tekhnologiya i konstruktssii mikroskhem, mikroprotssessorov i mikrosborok. — Moscow: Radio i svyaz', 1989.]

6. Спирин В. Г. Многоуровневые платы с толстоленочной полимерной изоляцией // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 5. — С. 3–7. [Spirin V. G. // Tekhnologiya i konstruirovanie v elektronnoi apparature. 2012. N 5. P. 3]

7. Ефимов И. Е., Козырь И. Я., Горбунов Ю. И. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность. — Москва: Высш. школа, 1986. [Efimov I. E., Kozyr' I. Ya., Gorbunov Yu. I. Mikroelektronika. Fizicheskie i tekhnologicheskie osnovy, nadezhnost'. — Moscow: Vyssh. shkola, 1986]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 17.01 2013 г.*

Spirin V. G. **Microassembly on silicon board for accelerometer.**

*Keywords: multilevel circuit board, thin-film micromodule.*

The paper presents microassembly design and technology for accelerometer, carried out on a silicon plate with three commutation levels and thin film resistors on both of its surfaces.

Russia, Arzamas Polytechnic Institute (branch) of the NSTU.

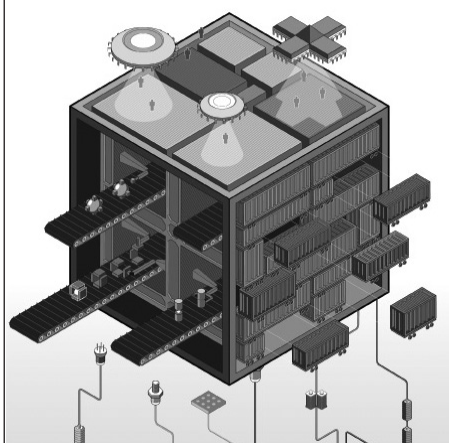
Спирин В. Г. **Мікроборка на кремнієвій платі для акселерометра.**

*Ключові слова: багаторівнева плата, тонкоплівкова мікроборка.*

Розглянуто конструкцію і технологію мікроборки для акселерометра, виконаної на кремнієвій платі, з трьома рівнями комутації та тонкоплівковими резисторами на обох її поверхнях.

Росія, Арзамаський політехнічний інститут (філія) НДТУ.

## ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



newElectronics® ChipEXPO RUSSIA

## НОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА — 2014 главная российская выставка электронных компонентов и модулей

25—27 марта  
Москва, Экспоцентр на Красной Пресне

### Тематические разделы выставки

Полупроводниковые устройства  
Активные компоненты  
Пассивные компоненты  
Оптоэлектроника  
Радио- и СВЧ-компоненты  
Датчики, сенсоры, средства контроля  
Дисплеи  
Источники питания  
Компоненты АСУ ТП  
Компоненты ЦОС  
Соединители

Трансформаторы и ферромагнитные компоненты  
Электромеханические компоненты  
Материалы, инструменты для электроники  
Приборы, тестовое оборудование  
Программно-аппаратные средства разработки  
Производство электронных компонентов  
Поставка электронных компонентов  
Разработка и производство электроники  
Контрактное производство электроники  
Информационные и консультационные услуги

УДК 62-711

*К. т. н. А. Б. РАССАМАКИН, Е. В. БЫКОВ, к. т. н. С. М. ХАЙРНАСОВ, к. т. н. Б. М. РАССАМАКИН*

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: sergey.khairnasov@gmail.com

## ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА НА ОСНОВЕ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

*Исследована система охлаждения светодиодного светильника, функционирующая по принципу тепловой трубы. Приведено описание экспериментального стенда, методика и результаты испытаний, проведенных для различного положения светильника при потребляемой электрической мощности 196 Вт. Показано, что рассмотренная система охлаждения обеспечивает заданный температурный режим светодиодов.*

*Ключевые слова:* светодиод, система охлаждения, тепловая труба.

В качестве энергосберегающих светильников сегодня все чаще применяются светодиодные осветительные приборы. Такие приборы являются перспективными, прежде всего, при использовании их в промышленных и общественных объектах, что связано с рядом преимуществ светодиодов — обеспечивая высокую освещенность, они потребляют мало энергии, позволяют получить любой необходимый цвет излучения и, кроме того, имеют продолжительный срок службы. Производители светодиодов сегодня заявляют о 100 000 часов или 11 годах непрерывной их работы. Благодаря отсутствию стеклянной колбы светодиоды очень надежны и механически прочны. Среди прочих положительных качеств светодиодов можно выделить их миниатюрность и безопасность, связанную с работой при низком напряжении и с малым выделением тепла в потоке излучения, т. е. в инфракрасном диапазоне спектра. При этом, однако, доля электрической энергии, идущей на генерирование тепла в  $p-n$ -переходе, значительна [1]. Поэтому существует значительное выделение тепла в зоне кристаллов светодиодов.

С появлением мощных (100 Вт и выше) осветительных приборов на основе светодиодов эффективный отвод тепла стал очень важным фактором обеспечения их нормальной работы, т. к. при перегреве снижается световой поток светодиода, ухудшаются световые характеристики и уменьшается срок службы. Основным и определяющим параметром при тепловых расчетах светодиодов является температура  $p-n$ -перехода, которая не должна превышать максимально допустимую, выше которой в полупроводнике происходят процессы, ведущие к некорректному функционированию, а в дальнейшем — к преждевременному выходу устройства из строя [2].

В современных осветительных приборах применяются пассивные и активные устройства охлаждения, основанные на методах отвода тепла теплопроводностью и конвекцией.

Пассивные системы охлаждения — металлические радиаторы — обладают такими преимуществами, как простота конструкции, надежность, дешевизна и отсутствие дополнительных энергозатрат. Однако для применения в мощных осветительных приборах на основе светодиодов они непригодны, поскольку требуется слишком большая площадь теплоотвода.

Активные системы охлаждения, основанные на принудительном движении воздуха или теплоносителя в контуре, могут обеспечить необходимый температурный уровень, однако они шумны, малонадежны и к тому же требуют дополнительного оборудования, а значит, их использование значительно повышает первоначальную стоимость устройства и эксплуатационные расходы.

Все это побуждает к поиску альтернативных эффективных систем охлаждения. Проведенные ранее исследования других авторов, в которых сравнивались различные системы охлаждения для радиоэлектронной аппаратуры, свидетельствуют о высокой эффективности применения тепловых труб для отбора теплоты и поддержания теплового режима электронных устройств [3]. Такой подход возможен и для светодиодных осветительных приборов. Например, производитель [4] применяет целый ряд технических решений с использованием тепловых труб для охлаждения светодиодов, по принципу тепловой трубы устроена система охлаждения светодиодного светильника [5]. В настоящей работе исследованы тепловые режимы последней, а также проведено ее сравнение с конструкци-



Рис. 1. Внешний вид светильника с системой охлаждения

ей на основе радиаторного профиля, имеющего идентичную геометрию и площадь поверхности.

Рассматриваемая система охлаждения представляет собой оребренный полый цилиндр высотой 230 мм, диаметром 170 мм, изготовленный из алюминиевого сплава 6060. В нижней части конструкции установлены светодиоды (7 кластеров по 3 светодиода), как это показано на **рис. 1**. Потребляемая светильником электрическая мощность составляет 196 Вт, выделяемая тепловая мощность — 147 Вт. Температура поверхности монтажа светодиодов не должна превышать 90°C при температуре окружающей среды до 35°C.

Система охлаждения работает как «паровая камера»: ее герметичный корпус заполнен теплоносителем, который находится в парожидкостном состоянии, и перенос теплоты происходит благодаря непрерывному внутреннему испарительно-конденсационному циклу. То есть, паровая камера представляет собой так называемый сверхпроводник тепла, обеспечивая мгновенную передачу теплоты от зоны подвода в зону охлаждения и почти равномерное распределение температуры по поверхности камеры [6].

Для проведения исследований была собрана экспериментальная установка, принципиальная схема которой изображена на **рис. 2**. Значения температуры фиксировались медь-константановыми термопарами с интервалом 6 секунд и передавались с помощью аналогово-

цифрового преобразователя к компьютеру. Общая электрическая мощность, подаваемая на светильник, измерялась с помощью ваттметра.

Во время проведения опытов температура окружающей среды составляла  $21 \pm 0,5^\circ\text{C}$ .

Показанные на **рис. 3** датчики ДТ1 и ДТ2 измеряют температуру в точках, характеризующих работу тепловой трубы — в зоне конденсации (**ЗК**) и в зоне испарения (**ЗИ**) соответственно. Разность этих показаний определяет максимальный перепад температуры по системе охлаждения. Показания датчика ДТ3 на поверхности кластерной сборки отличались на  $5 \pm 0,1^\circ\text{C}$  от показаний датчика ДТ2, что соответствует проведенным расчетам для термического сопротивления кластерной сборки, равного 0,0333 К/Вт.

Исследования проводились для двух положений системы охлаждения: вертикального (зона нагрева снизу) и под углом 45° к горизонту.

Сравнительный анализ тепловых режимов паровой камеры и аналогичного радиаторного профиля при вертикальном положении устройства (**рис. 4, а**) показывает существенную разницу в температуре поверхности монтажа кластерных сборок (зоны испарения) — до 19°C. Такое преимущество паровой камеры обусловлено тем, что ее применение обеспечивает равномерное распределение температуры по поверхности, а значит, и более эффективное отведение теплоты.

При наклонном положении устройства характеристики паровой камеры незначительно ухудшаются: температурный перепад увеличивается и составляет примерно 6°C в начале периода разогрева, возрастая до 7...7,5°C при выходе на стационарный режим работы (**рис. 4, б**). В связи с этим температура на монтажной поверхности увеличивается на 5°C по сравнению с вертикальным положением.

На **рис. 4, а** следует отметить наблюдаемый примерно на 400-й секунде момент «старта» работы тепловой камеры, который характеризуется резким сокращением перепада температуры по высоте (примерно от 6 до 1,5°C), после чего его ве-

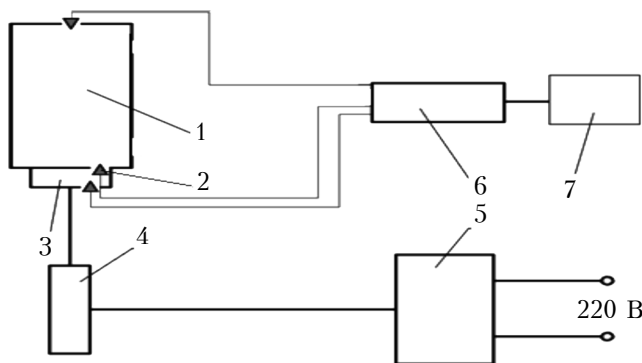


Рис. 2. Схема измерительной установки:  
1 — система охлаждения; 2 — датчики температуры (ДТ1 — ДТ3); 3 — сборка светодиодов; 4 — блок питания; 5 — блок подачи и измерения мощности; 6 — аналого-цифровой преобразователь; 7 — компьютер

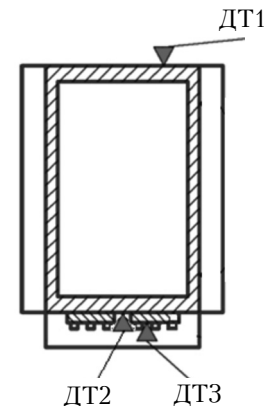


Рис. 3. Схема установки термопар

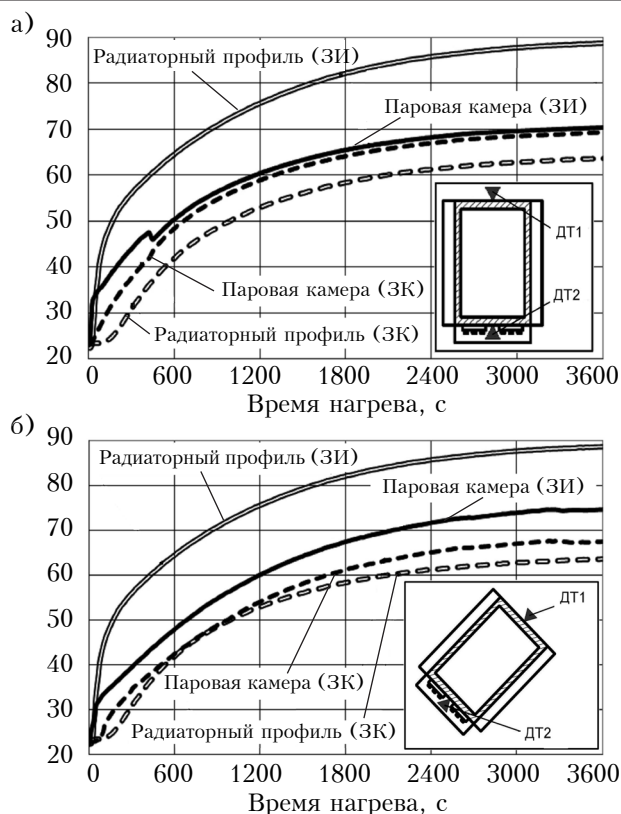


Рис. 4. Температурные режимы паровой камеры и радиаторного профиля при вертикальном размещении устройства (а) и под углом 45° (б)

личина остается почти неизменной. На рис. 4, б такого эффекта не наблюдается, что связано с нехарактерным для паровой камеры наклонным размещением.

Исследования показали, что в стационарном режиме значения температуры поверхностей в зоне конденсации и в зоне испарения составляют, соответственно, 68 и 70°C для паровой камеры в вертикальном положении и 67 и 75°C в наклонном, а для радиаторного профиля — 62 и 89°C. При этом, как было сказано выше, светодиоды расположены на монтажной плате, тепловое сопротивление которой вызывает дополнительный рост температуры еще на 5°C. Это означает, что температура в зоне монтажа светодиода при применении радиаторного профиля составит 94°C при допустимом значении 90°C. Что же касается работы паровой камеры, ее можно считать удовлетворительной — даже в неблагоприятных условиях, при наклонном положении, она обеспечивает охлаждение поверхности монтажа до 80°C, т. е. запас «прочности» составляет около 10°C.

Таким образом, использование системы охлаждения «паровая камера» для обеспечения заданного температурного режима светодиодов имеет существенный потенциал при необходимости повышения общей электрической мощности светильника при постоянных геометрических и весовых характеристиках.

В дальнейшем авторы планируют продолжать исследования, направленные на поиск новых конструкций систем охлаждения, работающих по принципу тепловой трубы, рассчитанных на отвод больших тепловых мощностей от светодиодов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. [http://www.lighting.philips.com/ru\\_ru/lightcommunity/trends/led/anatomy/heat.wpd](http://www.lighting.philips.com/ru_ru/lightcommunity/trends/led/anatomy/heat.wpd)
2. Руденко Н. М., Гурба О. В. Аналіз та розрахунок теплового режиму потужних світлодіодів // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2010. — № 41. — С. 115–120. [Rudenko N. M., Gurba O. V. // Visnik NTUU «KPI». Seriya: Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannya. 2010. N 41. P. 115]
3. Christopher A. Soule. Heat pipe reliability in high-power applications // Power Electronics Technology. — August 2004. — P. 40–44.
4. [http://www.innovatecha.com/2007\\_LED\\_Catalog.pdf](http://www.innovatecha.com/2007_LED_Catalog.pdf)
5. Пат. 40882 України. Світлодіодний освітлювальний пристрій / В. М. Стожок, О. І. Загуляев. — 2009. — Бюл. № 8. [Pat. 40882 Ukraini. / V. M. Stozhok, O. I. Zagulyayev. 2009. Byul. № 8]
6. Reay D. A., Kew P. A. Heat pipes. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 01.08 2013 г.

Rassamakin A. B., Bykov E. V., Khairnasov S. M., Rassamakin B. M. **Heat management of a cooling system based on the heat pipe for LED lighting fixtures.**

**Keywords:** LED, cooling system, heat pipe.

The authors have investigated a LED lamp cooling system that operates on a heat pipe basis. The paper describes the experimental stand, methods and results of the tests carried out for the different positions of the lamp at energy consumption of 196 W. It is shown that the considered cooling system ensures proper temperature of LEDs.

Ukraine, NTUU «KPI».

Рассамакін А. Б., Биков Є. В., Хайрнасов С. М., Рассамакін Б. М. **Теплові режими системи охолодження світлодіодних світильників на основі теплової труби.**

**Ключові слова:** світлодіод, система охолодження, теплова труба.

Досліджено систему охолодження світлодіодного світильника, що функціонує за принципом теплової труби. Наведено опис експериментального стенду, методика та результати випробувань, проведених для різного положення світильника при спожитій електричній потужності 196 Вт. Показано, що розглянута система охолодження забезпечує належний температурний режим світлодіодів.

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут».



УДК 669.054.2

А. И. КОНДРИК, Д. А. СОЛОПИХИН, А. П. ЩЕРБАНЬ

Украина, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

## РАФИНИРОВАНИЕ Cd И Zn ОТ ПРИМЕСЕЙ ВНЕДРЕНИЯ ПРИ ДИСТИЛЛЯЦИИ С ГЕТТЕРНЫМ ФИЛЬТРОМ ZrFe

*Проведен анализ поведения примесей внедрения в Cd и Zn с точки зрения термодинамики. Рассмотрены восстановительные реакции оксидов кадмия, цинка и углерода, а также нитрида цинка с материалом геттера из сплава Zr–Fe в зависимости от температуры и величины вакуума. Выработаны оптимальные исходные температурные и вакуумные условия проведения процессов глубокого рафинирования Cd и Zn от примесей внедрения. Экспериментально показано, что предложенный способ рафинирования обеспечивает более эффективную очистку кадмия и цинка от примесей внедрения, чем дистилляция без фильтра: их содержание снижается более чем на порядок по сравнению с концентрацией в исходных металлах.*

*Ключевые слова:* высокочистые металлы, примеси внедрения, очистка, вакуумная дистилляция, геттерный фильтр.

Высокочистые металлы Cd и Zn являются исходными составными компонентами многих полупроводниковых соединений и сцинтилляционных материалов. Многокомпонентные полупроводниковые (CdTe, CdZnTe) и сцинтилляционные (CdWO<sub>4</sub>, ZnWO<sub>4</sub>, CdMoO<sub>4</sub>, ZnMoO<sub>4</sub>, ZnSe) монокристаллы применяются для изготовления детекторов ионизирующего излучения [1], низкофоновых сцинтилляторов для регистрации электромагнитного излучения различных диапазонов, в том числе и таких редких событий, как безнейтринный двойной бета-распад ядер и регистрация частиц темной материи [2], к которым в настоящее время проявляется повышенный интерес. Для синтеза качественных детекторных и сцинтилляционных материалов чистота исходных кадмия и цинка должна быть не менее 99,9999 – 99,99999 % с концентрацией каждой примеси из всего спектра металлических элементов (до 80) не более  $1 \cdot 10^{-6}$  мас. %, в том числе содержание примесей внедрения (C, N, O) должно быть на уровне  $1 \cdot 10^{-5}$  мас. %. Это необходимо учитывать при получении высокочистых Cd и Zn, что в свою очередь требует разработки и исследования новых подходов к процессам глубокого рафинирования этих металлов.

Уровень чистоты рафинируемых кадмия и цинка в основном ограничивается концентрацией остаточных примесей внедрения [3]. Удалять их из металлов весьма затруднительно из-за образования сильных связей этих примесей с основой. Обычно содержание примесей внедрения в

высокочистых Cd и Zn находится на уровне не менее  $5 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-3}$  мас. %, в то время как содержание металлических примесей можно довести до уровня менее  $1 \cdot 10^{-5}$  мас. % обычными дистилляционными методами рафинирования.

Для химически активных металлов дистилляция в вакууме является наилучшим методом очистки от газовых примесей, поскольку в этом случае уменьшается газопоглощение. Кислород и углерод, как правило, удаляются из металлов не в атомарном состоянии, а в виде соединений, поэтому при дистилляции в вакууме нужно сочетать процессы испарения и конденсации с восстановительными реакциями, которые могут быть осуществлены при использовании химически активных геттерных фильтров.

При выборе геттерного материала для очистки Cd и Zn нами были учтены следующие требования к геттеру: высокая химическая активность к газовым примесям (H, N, O) и углеродсодержащим газам; неспособность геттера взаимодействовать с парами Zn и Cd; низкие значения упругости паров материала геттера при температуре использования; высокая сорбционная активность в интервале рабочих температур процессов дистилляции (420 – 540°C);

Ранее в ННЦ ХФТИ были исследованы сорбционные свойства ряда химически активных металлов, интерметаллических соединений и сплавов на основе циркония и гафния [4, 5]. Эти материалы имеют рабочую температуру 200 – 500°C и могут быть неоднократно использованы после соответствующей активации.

Как следует из [4], высокими сорбционными свойствами обладают сплавы циркония и гафния с железом. В силу этого, а также простоты полу-

Авторы выражают благодарность проф. Г. П. Ковтуну за обсуждение материалов статьи и полезные критические замечания

чения и сравнительно низкой стоимости в качестве материала геттерного фильтра для очистки Cd и Zn от примесей внедрения нами был выбран сплав Zr—Fe. Кроме того, предварительные эксперименты по дистилляции в вакууме показали, что эффективность очистки Cd и Zn с использованием фильтра из Zr—Fe выше, чем с фильтром из Zr.

В настоящей работе были исследованы процессы очистки Cd и Zn от примесей внедрения методом вакуумной дистилляции с применением в качестве восстановителя геттерного фильтра из сплава Zr—Fe с целью определения условий повышения эффективности очистки.

#### Термодинамические свойства примесей внедрения

На первоначальном этапе очистки кислород и углерод удаляются в виде легколетучих соединений с другими примесями, однако по мере повышения чистоты металла кислород, углерод и азот, образующие сильные связи с основой в виде оксидов, карбидов, нитридов, часто становятся трудноудаляемыми остаточными примесями. Испаряющийся металл может также образовывать соединения с атомами и молекулами газовой среды. Если образуемые соединения стабильны, то примесь может попадать в дистиллят. Таким образом, при глубоком рафинировании металлов следует обратить внимание на поведение стабильных соединений кислорода, углерода и азота. При разработке эффективного процесса очистки от примесей внедрения важно знать их термодинамические свойства в металлах. Эта информация существенна для выбора технологических условий и оценки эффективности процессов рафинирования.

Рассмотрим поведение примесей внедрения в Cd и Zn на примере кислорода.

Одной из характеристик относительной устойчивости оксидов различных металлов ( $MeO$ ) является их кислородный потенциал или изменение свободной энергии Гиббса ( $\Delta G_{MeO}$ ) при образовании оксидов. Для оценки влияния вакуума на стойкость оксидов можно использовать стандартное изменение энергии Гиббса для реакции образования оксида металла ( $\Delta G_{MeO}^0$ ) с поправкой на величину, учитывающую переход металла в газообразное состояние. Дистилляцию Cd и Zn в вакууме можно проводить при температуре около  $0,6T_{кип}^{Me}$ , где  $T_{кип}^{Me}$  — температура кипения металла при атмосферном давлении.

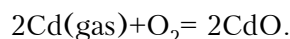
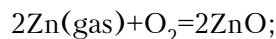
Для случая когда активность  $MeO$  равна 1 и  $T_{кип}^{Me} < T_{кип}^{MeO}$  кислородный потенциал образования твердого оксида двухвалентного металла входят по формуле

$$\Delta G_{MeO} = \Delta G_{MeO}^0 - 2RT \ln \frac{P}{1,013 \cdot 10^5}, \quad (1)$$

где  $T$  — температура системы (в К);

$P$  — давление паров металла (в Па).

Процессы испарения в вакууме кадмия, цинка и примеси кислорода сопровождаются реакциями образования и распада оксидов этих металлов. Цинк образует в конденсированном и газообразном состоянии стабильный оксид ZnO [6], кадмий — стабильный оксид CdO, существующий в конденсированном и газообразном состояниях. Реакции их образования имеют вид



Оценим изменение устойчивости оксидов при изменении температуры и степени вакуума. Для дистилляции цинка при температурах выше точки кипения ( $907^\circ\text{C}$ ) кислородный потенциал ZnO с учетом (1) запишется в виде

$$\Delta G_{ZnO} = -910012 + 375,22T - 38,3T \cdot \lg \frac{P}{1,013 \cdot 10^5}. \quad (2)$$

Однако ввиду сильного испарения цинка в вакууме при  $T=460\dots 600^\circ\text{C}$ , его дистилляцию можно проводить уже при этих температурах, а выражение (2) экстраполировать на эту область, т. к. здесь также имеется паровая фаза Zn. В указанном температурном интервале ZnO существует в твердом состоянии, что позволяет применить формулы (1) и (2). В геттерный фильтр попадают молекулы кислорода и паров цинка, которые могут образовать там оксид, поэтому необходимо провести сравнение  $\Delta G_{ZnO}$  и кислородного потенциала для образования оксидов компонентов геттера  $\Delta G_{MeO}$  в рабочих интервалах температуры и давления газовой среды. Образующиеся в паровой фазе молекулы ZnO также могут достигать геттера при их транспортировке атомами интенсивно испаряющегося Zn при давлении его паров около 133 Па и ниже, вплоть до 13,3 Па.

Аналогичную физическую картину можно привести и при анализе устойчивости CdO. Кислородный потенциал CdO запишется как

$$\Delta G_{CdO} = -722426 + 399,24T - 38,3T \cdot \lg \frac{P}{1,013 \cdot 10^5}. \quad (3)$$

Для примеси азота можно рассмотреть изменение энергии Гиббса при образовании нитридов. Цинк с азотом образует относительно устойчивое химическое соединение  $Zn_3N_2$ , характерное для элементов группы IIA [7]. По экспериментальным данным это соединение стабильно до  $350^\circ\text{C}$  в вакууме и до  $500^\circ\text{C}$  на воздухе, растворимость азота в цинке мала.

Кадмий с азотом могут образовать нитрид  $Cd_3N_2$ , который разлагается при температуре, близкой к температуре плавления Cd, а образующийся газообразный азот может удаляться

из системы и без геттера. Растворимость азота в кадмии не обнаружена до температуры  $400^{\circ}\text{C}$  [7].

В системах  $\text{Zn}-\text{C}$  и  $\text{Cd}-\text{C}$  возможно образование лишь карбида цинка  $\text{ZnC}_2$ , но это соединение можно получить только путем химического синтеза. Растворимость углерода в кадмии и цинке при температурах испарения мала. При нагреве в вакууме происходит газовыделение из кадмия и цинка в виде  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ . Очистка кадмия и цинка от углерода в процессе дистилляции с применением геттерного фильтра может проходить путем восстановления летучего соединения  $\text{CO}$  с образованием оксидов циркония и железа. Парциальные давления  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  предполагаются малыми по сравнению с общим давлением в системе, которое определяется парами металла.

Рассмотрим с точки зрения термодинамики очистку  $\text{Cd}$  и  $\text{Zn}$  от примесей внедрения в процессе вакуумной дистилляции с геттерным фильтром  $\text{ZrFe}$  на примерах восстановления  $\text{CdO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Zn}_3\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ .

На рис. 1 показаны графики зависимости изменения энергии Гиббса при образовании  $\text{ZnO}$  и других оксидов от температуры для различного давления газовой среды в системе в пересчете на 1 моль кислорода. Аналогичные зависимости показаны для образования  $\text{CdO}$  и  $\text{Zn}_3\text{N}_2$  на рис. 2, 3. Из рис. 1 и 2 видно, что стабильность оксидов  $\text{Cd}$  и  $\text{Zn}$  уменьшается с повышением температуры системы и повышением степени вакуума. Для распада  $\text{ZnO}$  при атмосферном давлении необходима температура выше  $2000^{\circ}\text{C}$ , в то время как в вакууме при давлении 1,33 Па этот оксид нестабилен уже при  $T > 1350^{\circ}\text{C}$ , а при давлении 0,0133 Па — при  $T > 1200^{\circ}\text{C}$ . Аналогичная картина наблюдается

для  $\text{CdO}$  и отличается только меньшими значениями температуры нестабильности. Из рис. 3 видно, что при рабочих температурах дистилляции цинка ( $480-520^{\circ}\text{C}$ ) соединение  $\text{Zn}_3\text{N}_2$  нестабильно уже при 133 Па.

Если в процессе дистилляции металла достигнутого вакуума и температуры в системе недостаточно для распада оксида, то для очистки можно использовать восстановление металлов из их

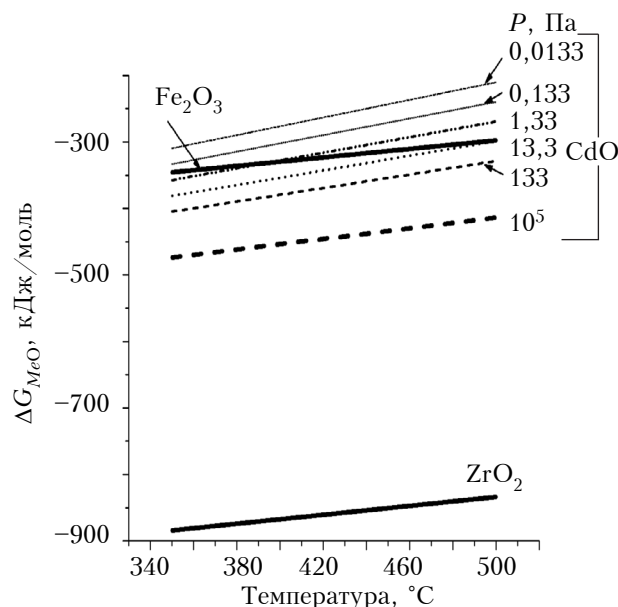


Рис. 2. Температурная зависимость изменения энергии Гиббса для образования  $\text{CdO}$  при разном давлении паров металлов в системе, а также для образования  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  при парциальном давлении кислорода  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па

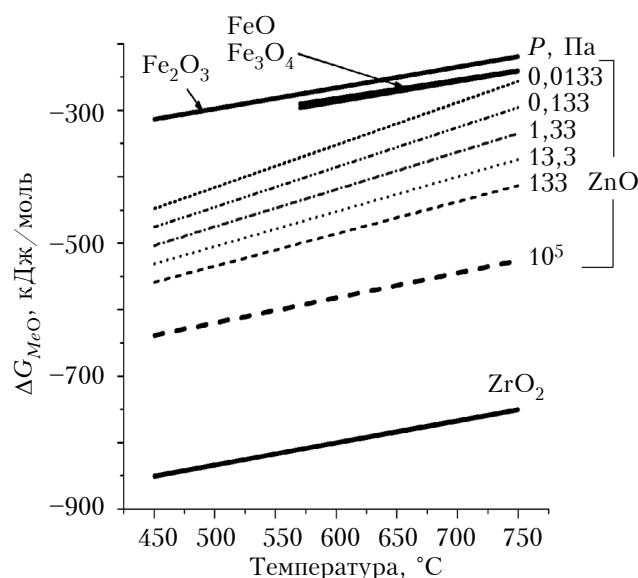


Рис. 1. Температурная зависимость изменения энергии Гиббса для образования  $\text{ZnO}$  из паров  $\text{Zn}$  и  $\text{O}_2$  при разном давлении паров металлов в системе, а также для образования оксидов  $\text{Zr}$ ,  $\text{Fe}$  при парциальном давлении кислорода  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па

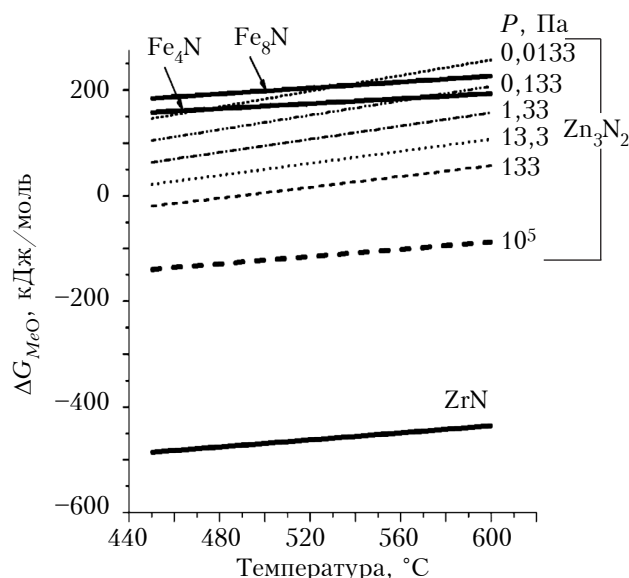
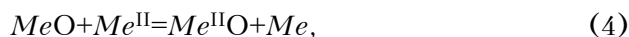


Рис. 3. Температурная зависимость изменения энергии Гиббса для образования  $\text{Zn}_3\text{N}_2$  при разном давлении паров металлов в системе, а также для образования нитридов циркония и железа при парциальном давлении азота  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па

оксидов с применением восстановителей. Схема реакции восстановления имеет вид



где  $Me^{II}$  — металл-восстановитель.

В качестве металла-восстановителя был выбран твердый сплав ZrFe. Цирконий обладает гораздо большим химическим сродством к кислороду, чем железо. В конденсированном состоянии для рассматриваемых условий установлено наличие лишь одного стабильного оксида — диоксида циркония  $ZrO_2$ , реакция образования которого и изменение энергии Гиббса имеют вид [6, 8]



$$\Delta G_{ZrO_2} = -1092754 + 183,8T -$$

$$-19,15T \cdot \lg \frac{P_{O_2}}{1,013 \cdot 10^5} \quad \text{при } T=298-2123 \text{ К,}$$

где  $P_{O_2}$  — парциальное давление кислорода в системе.

Из графиков на рис. 1 и 2 видно, что с точки зрения термодинамики восстановление  $CdO$ ,  $ZnO$  цирконием легко осуществимо во всем исследованном интервале температур и давлений. С другой стороны, это еще не гарантирует активного протекания реакции. Поскольку в нашем случае дистилляция кадмия и цинка проводится при пониженной температуре, вполне может оказаться, что локальной температуры реагентов недостаточно для быстрого развития реакции. В металлургии для активизации металлотермического восстановления в состав реагирующей системы нередко вводят легковосстановимые оксиды, что обеспечивает дополнительное выделение тепла, способствующее повышению температуры реагентов. Например, при получении титана алюминотермическим восстановлением  $TiO_2$  в состав шихты добавляют легковосстановимый оксид  $Fe_3O_4$  (на 100 г  $TiO_2$  нужно 83 г  $Fe_3O_4$  [8]). В связи с этим можно ожидать повышение эффективности очистки  $Cd$  и  $Zn$  от кислорода и азота при проведении реакции восстановления цирконием в присутствии оксидов железа. Железо легко окисляется в окислительной среде с образованием  $FeO$ ,  $Fe_3O_4$  и  $Fe_2O_3$ . В рассматриваемых условиях происходит реакция образования  $Fe_2O_3$  [6, 8]:



$$\Delta G_{Fe_2O_3} = -542916 + 165,9T -$$

$$-19,15T \cdot \lg \frac{P_{O_2}}{1,013 \cdot 10^5} \quad \text{при } T=298-1809 \text{ К.}$$

Проведенный нами предварительный эксперимент показал более высокую степень очистки  $Cd$  и  $Zn$  от примесей при дистилляции с геттером из ZrFe по сравнению с геттером из чистого Zr. Очистка металлов от кислорода может протекать по следующей схеме. Кислород

из  $Cd$  или  $Zn$  переходит в Zr и Fe по реакциям (4) — (6), причем в (4)  $Me^{II}$  и  $Me^{II}O$  соответствуют Zr (Fe) и  $ZrO_2$  ( $Fe_2O_3$ ), а  $MeO$  соответствует  $CdO$  и  $ZnO$ . Кроме того, может осуществляться переход исходного кислорода из оксида железа в оксид циркония путем восстановления оксида железа цирконием по схеме реакции (4) с выделением тепла и повышением температуры геттера, что должно активизировать реакции восстановления металлов из  $CdO$  и  $ZnO$ , а также реакции (5) и (6). Аналогичную схему можно предложить и для очистки Zn от азота.

Вполне реальным способом очистки от углерода с помощью геттера может быть его восстановление из летучего соединения  $CO$ , выделяющегося из объема  $Cd$  и  $Zn$ . На поверхности геттера из ZrFe образуется оксид циркония и выделяется твердый углерод. Условием восстановления углерода является более высокое химическое сродство металлического геттера к кислороду, чем углерода к кислороду. Химическое сродство циркония и железа к кислороду оценивается по формулам (5) и (6), а углерода к кислороду — по изменению энергии Гиббса  $\Delta G_{C/CO}$  для реакции  $2C + O_2 = 2CO$ :

$$\Delta G_{C/CO} = -221120 - 17975T +$$

$$+ 38,3T \cdot \lg \frac{P_{CO}}{1,013 \cdot 10^5}, \quad (7)$$

где  $P_{CO}$  — парциальное давление  $CO$  в системе.

Формула (7) справедлива для случая, когда активность углерода равна 1 и парциальным давлением кислорода в системе можно пренебречь. Полагаем также, что в условиях вакуумной дистилляции летучее соединение  $CO$  не взаимодействует с парами цинка, кадмия и молекулами газовой среды. С началом восстановления углерода при  $T > 500^\circ C$  возможно вовлечение летучего соединения  $CO_2$  в процесс очистки согласно реакции  $C + CO_2 = 2CO$  с последующим восстановлением  $C$  из  $CO$ .

Температурная зависимость изменения энергии Гиббса для реакций образования оксидов железа показана на рис. 1 и 2, а нитридов железа — на рис. 3. Из рис. 2 следует, что восстановление  $CdO$  по рассмотренной выше схеме с использованием геттерного фильтра ZrFe возможно во всем интервале рассматриваемых температур и давлений. Как видно из рис. 1 и 3, участие железа в процессе восстановления  $ZnO$  возможно в сверхвысоком вакууме, а восстановления  $Zn_3N_2$  — при давлении в системе не ниже 0,0133 Па для рафинирования при температурах испарения Zn ( $480-520^\circ C$ ). Из рис. 3 также видно, что в высоком вакууме при повышенных температурах дистилляции соединение  $Zn_3N_2$  может распадаться. Соединения  $Fe_4N$  и  $Fe_8N$  также нестабильны при рабочих температурах дистилляции цинка, однако очистка цинка от азота вакуумной дистилляцией с геттером может проходить по той же схеме, что и очистка от кислорода. В условиях повышенных



температур и высокого вакуума должен преобладать распад соединения  $Zn_3N_2$  и удаление высвобождающегося газообразного азота из системы.

На рис. 4 показана температурная зависимость изменения энергии Гиббса для образования CO по реакции  $2C + O_2 = 2CO$  при различном парциальном давлении CO в системе, а также для образования  $Fe_2O_3$  и  $ZrO_2$ . Для сравнения приведена также зависимость стандартного изменения энергии Гиббса для образования  $CO_2$ . Из графиков видно, что только цирконий может напрямую участвовать в процессе очистки дистиллируемого металла от кислорода путем восстановления углерода из летучего соединения CO.

Выполненный термодинамический анализ окислительно-восстановительных реакций оксидов кадмия, цинка и углерода с материалом геттера из сплава Zr—Fe позволил получить исходные данные для выбора оптимальных температурных и вакуумных условий проведения процессов глубокого рафинирования этих металлов от примесей внедрения.

#### Исследование условий рафинирования

Рафинирование Cd и Zn с применением геттерного фильтра из сплава Zr (51 мас.%)—Fe (49 мас.%) проводили с использованием ранее разработанных устройства и способа, описанных в [9–12]. Процесс рафинирования Cd и Zn с применением фильтра из ZrFe проводили в квазизамкнутой системе, помещенной в камеру с давлением  $(2,7–5,3) \cdot 10^{-3}$  Па при температурах испарения кадмия (380–420°C) и цинка (480–520°C). Исходными материалами для рафинирования являлись кадмий технической чистоты марки

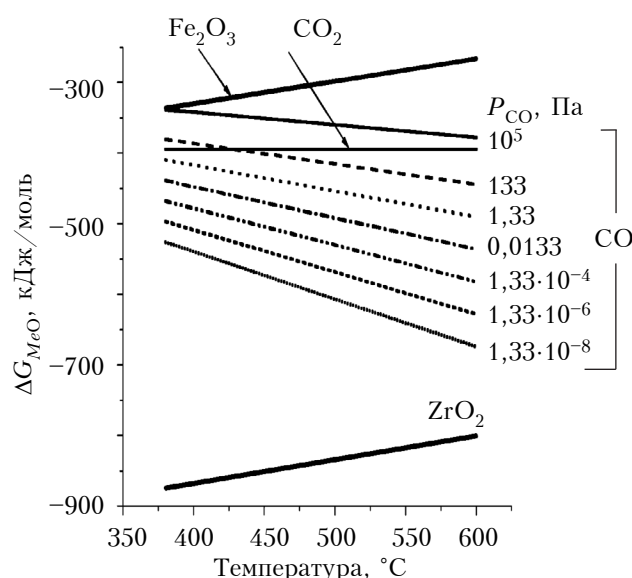


Рис. 4. Температурная зависимость изменения энергии Гиббса для образования CO под разным парциальным давлением CO, для образования  $CO_2$  под атмосферным давлением  $CO_2$ , а также для образования оксидов  $ZrO_2$ ,  $Fe_2O_3$  при парциальном давлении кислорода  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па

Кд0А (ГОСТ 1467-93) и слитки цинка марки ЦВ00 (ГОСТ 3640-94).

Эффективность очистки от примесей внедрения с применением геттерного фильтра представлена в таблице. Из таблицы видно, что предложенный способ обеспечивает более эффективную очистку кадмия и цинка от газовых примесей и углерода (дистилляты II), чем дистилляция без фильтра. Степень очистки исходных металлов с геттером более чем десятикратная, в то время как очистка без геттера — трех—пятикратная. Как показал анализ, при дистилляции с фильтром происходит дополнительная (в 2–5 раз) очистка от основных металлических примесей по сравнению с дистилляцией без фильтра.

Из таблицы также видно, что эффективность очистки Zn от примесей внедрения с применением геттера немного выше, чем Cd. Для примесей кислорода и азота это связано с более высокой стабильностью соединений  $ZnO$  и  $Zn_3N_2$  по сравнению с  $CdO$  и  $Cd_3N_2$ . Сравнение данных таблицы и рис. 1–4 позволяет сделать вывод о том, что железо играет роль только катализатора восстановительных реакций в цинке. В кадмии Fe может еще и участвовать напрямую в процессах восстановления  $CdO$  с последующим переходом примесного кислорода из  $Fe_2O_3$  в  $ZrO_2$ . Кроме того, при дистилляции Cd возможно участие Fe в очистке газовой среды от молекулярного кислорода.

Количественный анализ содержания примесей в исходных и рафинированных образцах кадмия и цинка проверяли методом ионной масс-спектрометрии на оборудовании ГНЦ «Гиредмет» (г. Москва, Россия) — масс-

Состав примесей внедрения в кадмий и цинке после дистилляции с применением геттерного фильтра из сплава Zr (51 мас. %)—Fe (49 мас. %)

Металл	Примеси	Содержание примеси, $\times 10^{-4}$ мас. %		
		В исходном металле	В рафинированном металле	
			Дистиллят I (без геттера)	Дистиллят II (с геттерным фильтром)
Cd	C	20	6	< 1
	N	5	1	< 1
	O	45	10	< 1
	* $\Sigma_{внд}$	70	17	< 3
Zn	C	80	20	< 1
	N	20	6	< 1
	O	25	14	< 1
	* $\Sigma_{внд}$	125	40	< 3

\* $\Sigma_{внд}$  — суммарное содержание примесей внедрения

спектрометре JMS 01 B2 (JEOL, Япония). Воспроизводимость результатов анализа данным методом характеризуется относительным стандартным отклонением 0,15...0,30.

### Заключение

На основе проведенного анализа поведения примесей внедрения в Cd и Zn с точки зрения термодинамики были выработаны и обоснованы оптимальные исходные температурные и вакуумные условия проведения процессов глубокого рафинирования кадмия и цинка от примесей внедрения. Экспериментально показано, что предложенный способ рафинирования с применением геттерного фильтра из сплава Zr (51%)—Fe (49%) обеспечивает более эффективную очистку кадмия и цинка от примесей внедрения, чем дистилляция без фильтра. Их содержание снижается более чем на порядок по сравнению с концентрацией в исходных металлах.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ажажа В. М., Ковтун Г. П., Солопихин Д. А., Щербань А. П. Высокочистые металлы для микро- и нанoeлектроники // Перспективные материалы. — 2008. — Спецвыпуск. — С. 33—37. [Azhazha V. M., Kovtun G. P., Solopikhin D. A., Shcherban A. P. // Perspektivnye materialy. 2008. Spetsvyпуск. P. 33]
2. Даневич Ф. А. // Труды Межд. конф. «ИСМАРТ—2008». — Украина, Харьков: ISMA:54, 2009. [Danevich F. A. // Trudy Mezhd. konf. «ISMAРТ—2008». — Ukraine, Kharkov: ISMA:54, 2009]
3. Тихинский Г. Ф., Ковтун Г. П., Ажажа В. М. Получение сверхчистых редких металлов. — Москва: Металлургия, 1986. [Tikhinskiy G. F., Kovtun G. P., Azhazha V. M. Moscow: Metallurgiya, 1986]
4. Ажажа Р. В., Кривуля С. С., Свиначенко А. П. Исследование сорбционных характеристик нераспыляемого геттера на основе сплава Zr—Fe // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники» (11). — 2000. — № 5. — С. 19—21. [Azhazha R.V., Krivulya S.S., Svinarenko A.P. // Voprosy atomnoy nauki i tehniki. Seriya «Vakuum, chisty'e materialy, sverhprovodniki» (11). 2000. N 5. — P. 19]
5. Ажажа В. М., Коцарь М. Л., Борисов М. И. и др. Технология получения геттерных порошков для глубокой очистки газов // Высокочистые вещества. — 1992. — Вып. 4. — С. 108—111. [Azhazha V. M., Kocar' M. L., Borisov M. I. i dr. // Vysokochistye veshchestva. 1992. Vyp. 4. P. 108]
6. Куликов И. С. Термодинамика оксидов. — Москва: Металлургия, 1986. [Kulikov I. S. Termodinamika oksidov. — Moscow: Metallurgiya, 1986]
7. Куликов И. С. Термодинамика карбидов и нитридов: Справ. изд. — Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1988. [Kulikov I. S. Termodinamika karbidov i nitridov: Sprav. izd. — Chelyabinsk: Metallurgiya, Chelyabinskoe отделение, 1988]
8. Казачков Е. А. Расчеты по теории металлургических процессов. — Москва: Металлургия, 1988. [Kazachkov E. A. Moscow: Metallurgiya, 1988]
9. Патент 1246 Украины. Устройство для рафинирования металлов дистилляцией в вакууме / Г. П. Ковтун, А. П. Щербань. — 2002. — Бюл. № 5. [Patent 1246 Ukraine / G. P. Kovtun, A. P. Shcherban. 2002. Byul. N 5]
10. Патент 22541 Украины. Способ рафинирования металлов / С. Ю. Ларкин, Г. П. Ковтун, А. П. Щербань. — 2007. — Бюл. № 5. [Patent 22541 Ukraine / S. Yu. Larkin, G. P. Kovtun, A. P. Shcherban. 2007. Byul. N 5.]
11. Ковтун Г. П., Щербань А. П., Солопихин Д. А. и др. Исследование процесса получения высокочистого цинка как составляющего элемента детекторов ионизирующих излучений // ВАНТ, сер. «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники». — 2008. — № 1(17). — С. 20—23. [Kovtun G. P., Shcherban A. P., Solopikhin D. A. i dr. // VANT, ser. «Vakuum, chisty'e materialy, sverhprovodniki». — 2008. — N 1(17). P. 20]
12. Kovtun G. P., Shcherban A. P., Danevich F. A. et al. Production of radiopure natural and isotopically enriched cadmium and zinc for low background scintillators. // Functional materials. 2011. — Vol. 18, N 1. — P. 121—127.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 20.05 2013 г.

Kondrik A. I., Solopikhin D. A., Scherban' A. P.  
**Refining of Cd and Zn from interstitial impurities  
using distillation with a ZrFe getter filter.**

*Keywords: high-purity metals, interstitial impurities,  
cleaning, vacuum distillation, getter filter.*

Behavior of interstitial impurities in Cd and Zn is analysed in terms of thermodynamics. The authors consider reduction reactions of cadmium, zinc and carbon oxides, as well as zinc nitride with the getter material from the Zr-Fe alloy, depending on temperature and vacuum. Optimum initial temperature and vacuum conditions for the processes of deep refining of Cd and Zn from interstitial impurities has been developed. It has been shown experimentally that the proposed refining method provides a more effective cleaning of cadmium and zinc from the interstitial impurities than the distillation without a filter: the impurity content is reduced more than tenfold compared to the concentration in the input metal.

Ukraine, Kharkov, National Science Center Kharkov  
Institute of Physics and Technology.

Кондрик О. І., Солопихин Д. А., Щербань О. П.  
**Рафінування Cd і Zn від домішок проникнення при  
дистильції з гетерним фільтром ZrFe.**

*Ключові слова: високочисті метали, домішки про-  
никнення, очищення, вакуумна дистильція, гетер-  
ний фільтр.*

Проведено аналіз поведінки домішок проникнення в Cd і Zn з точки зору термодинаміки. Розглянуто відновні реакції оксидів кадмію, цинку і вуглецю, а також нітриду цинку з матеріалом гетера зі сплаву Zr—Fe залежно від температури і величини вакууму. Вироблені оптимальні вихідні температурні і вакуумні умови проведення процесів глибокого рафінування Cd і Zn від домішок проникнення. Експериментально показано, що запропонований спосіб рафінування забезпечує більш ефективну очистку кадмію та цинку від домішок проникнення, ніж дистильція без фільтра: їх зміст знижується більш ніж на порядок порівняно з концентрацією у вихідних металах.

Україна, м. Харків, Національний науковий центр  
«Харківський фізико-технічний інститут».

УДК 621.382.8.002.72

Д. т. н. В. Г. ВЕРБИЦКИЙ<sup>1</sup>, Н. И. ПЛИС<sup>2</sup>, к. т. н. В. Д. ЖОРА<sup>1</sup>, В. П. ГРУНЯНСКАЯ<sup>1</sup>Украина, г. Киев, <sup>1</sup>НИИ микроприборов НАНУ;Россия, г. Москва, <sup>2</sup>ОАО «Ангстрем»

E-mail: vdzhora@ukrpost.net

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ СБОРКИ МИКРОСХЕМ НА ГИБКИХ ПОЛИИМИДНЫХ НОСИТЕЛЯХ

*Приведена классификация методов сборки микросхем с использованием гибких полиимидных носителей различных типов, проведен их сравнительный анализ. Выделен наиболее приемлемый метод изготовления двухслойных гибких носителей.*

*Ключевые слова:* сборка микросхем, гибкий полиимидный носитель, качество соединений.

Технологические процессы изготовления микросхем на современном этапе характеризуются все более усиливающимся влиянием сборочных операций как на стоимость микросхем, так и на их технические параметры (массогабаритные характеристики, показатели качества, надежности и т. п.). Это обусловлено тем, что изготовление кристаллов проводится на пластинах диаметром до 300 мм высокопроизводительными групповыми методами, а при сборке манипулируют с каждым отдельно взятым чипом. При этом не только масса и размеры микросхем определяются массогабаритными характеристиками корпусов, но и цена их зачастую более чем на половину зависит от стоимости последних [1].

Появление многовыводных БИС и СБИС с кристаллами, насчитывающими сотни контактных площадок, только усугубило проблемы, возникающие при проведении сборочных операций. Как следствие, возникла проблема создания многовыводных корпусов, которые стоят недешево. Вместе с тем рост сложности микросхем напрямую связан с потерей их универсальности. В результате увеличилась номенклатура ИС и уменьшилась их тиражность, что еще более обострило проблему обеспечения микроэлектронной промышленности корпусами [2]. Важно отметить, что сборка СБИС, имеющих сотни выводов, традиционными методами проволочного монтажа существенно затруднена вследствие их сложности и возможности замыкания проволочных перемычек.

Все это вместе взятое только усиливает интерес к нетрадиционным методам сборки, особенно к методам сборки на гибких полиимидных носителях (ГПН), имеющих так называемые организованные выводы [2]. Методы сборки на ГПН основываются на присоединении к кристаллам пайкой или сваркой предварительно сформированных гибких выводов, вытравленных, как правило, из металлической фольги

и чаще всего закрепленных на полимерном диэлектрическом основании (**рис. 1**). Ведущие зарубежные фирмы считают методы автоматической сборки на ленточном носителе (АСЛН или ТАВ — Tape Automated Bonding) наиболее перспективными для сборки многовыводных СБИС и активно используют их различные модификации в производстве.

С другой стороны, технология АСЛН позволяет за счет закрепления выводов на полиимидной пленке существенно уменьшить размеры контактных площадок на чипах до 25×25 мкм при расстоянии между ними до 12,5 мкм. При этом значительно уменьшается площадь кристаллов, которая в большей степени определяется числом компонентов на кристалле, чем размерами контактных площадок на них.

Целью настоящей работы являлись классификация и сравнительный анализ методов сборки микросхем с использованием гибких полиимидных носителей различных типов.

Большое разнообразие возможных вариантов сборки и монтажа микросхем предопределяет использование ГПН различных конструкций. Гибкие носители различаются:

- структурным строением;
- материалами выводов и полимерного основания;
- количеством выводов;
- способами присоединения выводов ГПН к кристаллам и монтажа готовых микросхем;

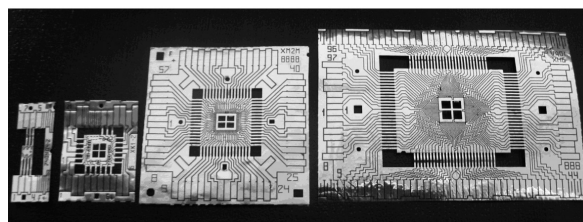


Рис. 1. Различные конструкции ГПН

— шириной лент, используемых как для изготовления ГПН, так и непосредственно при сборке ИС и их монтаже (сборочные ленты).

По структуре сборочные гибкие носители могут быть одно-, двух-, трех- и даже многослойными, получаемыми из двух и более обычных лент.

Однослойные ленты известных конструкций изготавливают из алюминиевой или медной фольги толщиной 35, 50 и 70 мкм. Их основным преимуществом является относительная дешевизна. К недостаткам, существенно ограничивающим их применение, относятся невозможность измерения параметров ИС на ленте (выводы до вырубки закорочены), возможность замыкания выводов на край кристалла и затруднения при сборке из-за неплоскостности выводов.

Более универсальны двухслойные гибкие носители, имеющие структуру «металл — полимер». Для изготовления выводов используется фольга, чаще всего катаная, например, медная толщиной 35 мкм [3] или алюминиевая толщиной 30 мкм [1, 2, 4], а в качестве диэлектрика — преимущественно полиимидный лак, который в процессе термообработки при определенных режимах превращается в полиимидную пленку [5]. Достоинствами двухслойного носителя являются высокая механическая прочность и стабильность размеров (отсутствие сдвига выводов при сварке). Он позволяет контролировать параметры ИС до вырубки, имеет широкий диапазон рабочих температур (от  $-200$  до  $+400^\circ\text{C}$ ) [5–7], и к тому же является сравнительно недорогим. Изготовление двухслойных ГПН требует травления как фольги, так и полиимида.

За рубежом наибольшее распространение получили трехслойные ленты-носители со структурой «металл — адгезив — полимер». Они позволяют проводить контроль и испытания ИС, имеют необходимую прочность при перемотке с катушки на катушку, сохраняют при этом плоскостность и не дают усадки, их параметры достаточно стабильны.

Технология изготовления трехслойных носителей, как правило, включает операции создания технологических окон в полиимидной пленке толщиной порядка 100 мкм методом прецизионной штамповки, приклеивания (дублирования) к этой пленке металлической фольги с помощью адгезива, фотолитографического травления фольги для получения выводов и, в случае использования медной фольги, дополнительного электрохимического покрытия выводов золотом или припоями. Правильный выбор адгезива, его толщины и обеспечение равномерности нанесения определяют качество трехслойного носителя. Так, например, при малой толщине адгезива ухудшается сцепление полимера с металлом, а при слишком большой — адгезив затекает в центральные отверстия и ухудшает обслуживаемость выводов. Следует отметить, что термостойкость адгезивов существенно ниже, чем у

полиимидов, что сказывается на общей термостойкости трехслойных носителей.

Выбор полимеров диэлектрического основания для изготовления гибких носителей достаточно широк. Применяются самые различные материалы: полиэтилентерефталат, полиимид (Kapton различных типов), полиэфирсульфон [6], полипарабановая кислота, гибкий эпоксипластик и даже полиэтилен. Наибольшее распространение получил полиимид вследствие его исключительной способности сохранять стабильность свойств при высоких температурах [5], что позволяет проводить операции термокомпрессии и эвтектической пайки кремния с золотом при температуре около  $400^\circ\text{C}$  [2]. Кроме того, полиимидные пленки характеризуются ценнейшими свойствами [7], такими как:

- высокая электрическая прочность (280 — 300 кВ/мм) [5];
- малая плотность ( $\gamma=1,42$  г/см<sup>3</sup>) [7];
- высокая радиационная стойкость (500 — 5000 Мрад) [7];
- низкая диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon = 3,5$ ) [5, 7];
- относительно высокая в сравнении с другими полимерами теплопроводность (150 — 180 Вт/мК) [8];
- высокая механическая прочность в сочетании с эластичностью [5];
- температурный коэффициент линейного расширения полиимида почти такой же, как и у металлов, применяемых для изготовления выводов ГПН (алюминия и меди);
- полиимидные пленки поддаются травлению в сильнощелочных растворах, что при необходимости позволяет получать в них сквозные отверстия [7, 8];
- газовыделение полиимидных пленок незначительное, что позволяет проводить вакуумное напыление различных металлов на них и даже изготавливать многослойные гибкие платы [1, 2, 4, 7].

Этот комплекс свойств полиимидных материалов предопределил их широкое использование в микроэлектронике не только в качестве полимерного основания в ГПН и в гибких платах, но и в качестве диэлектрического слоя при изготовлении многослойной металлизации на кристаллах СБИС.

За рубежом в качестве материала проводящего слоя для получения выводов, как правило, используется медь (толщиной от 20 до 76 мкм), позволяющая проводить сборку кристаллов высокопроизводительными методами групповой пайки. Медь в сравнении с алюминием обладает большей механической прочностью, а также тепло- и электропроводностью. Однако применение меди вызывает необходимость модификации технологии получения кристаллов с формированием на их контактных площадках монтажных шариковых или столбиковых выступов, например, из золота или меди с золотым или при-



пойным покрытием. Это вызвано тем, что в качестве материала контактных областей и межсоединений на кристалле в основном используется алюминий, который покрыт естественной оксидной пленкой, существенно затрудняющей пайку. Проведение модификации технологии, однако, ощутимо повышает стоимость кристаллов и является серьезным ограничением для применения меди [2].

К недостаткам меди относится также высокая окисляемость ее поверхности [2], создающая трудности при монтаже. В связи с этим медь используется только в составе многослойных проводников, в которых предусматривается защита ее поверхности, например, золотом или припоями.

В то же время, при использовании алюминия в качестве проводящего слоя (толщиной от 14 до 70 мкм) в местах соединения выводов с контактными областями кристаллов образуется однокомпонентная система Al—Al, не требующая создания дополнительных выступов на кристалле [2, 9]. В такой монометаллической системе исключается появление интерметаллических соединений в твердой фазе при эксплуатации приборов, в том числе при повышенных температурах. Немаловажным является и то, что алюминий, имеющий малый заряд ядра ( $Z=13$ ), не образует при облучении вторичных изотопов и устойчив к воздействию радиации [7, 9], а при более низкой в сравнении с медью теплопроводности дает выигрыш по массе примерно в 2 раза при одинаковом номинале сопротивления проводников [10]. Важно отметить также, что технология фотолитографического травления по алюминию достаточно хорошо отработана и позволяет получать проводники шириной до 28 мкм с точностью до  $\pm 3$  мкм при шаге менее 50 мкм [10].

В используемых в настоящее время ГПН количество выводов изменяется в довольно широком диапазоне — это и маловыводные ИС с количеством выводов меньше 10 (например, в случае ИС операционных усилителей) и ГПН для сборки СБИС, содержащие сотни выводов.

К кристаллам ИС ГПН монтируются либо групповой пайкой (выводы ГПН из меди с различными покрытиями, улучшающими пайку), либо сваркой, чаще всего ультразвуковой (выводы ГПН из алюминия). Важно подчеркнуть высокую надежность ультразвуковой сварки, т. к. при ее проведении имеется возможность подвода дозированной энергии УЗ-колебаний к каждому выводу ГПН. Проблема стоимости сборочных операций при этом решается путем применения высокоскоростных самообучающихся автоматов, например ЭМ-4062.

Готовые микросхемы на ГПН у потребителя можно монтировать либо пайкой (выводы ГПН из меди или алюминия с дополнительной обработкой [4]), либо ультразвуковой сваркой (выводы из алюминия) (рис. 2).

Ширина используемых сборочных лент, содержащих ГПН, изменяется в довольно широких пределах — от менее 10 до 150 мм.

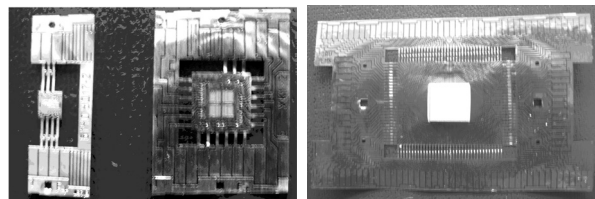


Рис. 2. Микросхемы на гибком полиимидном носителе (материал выводов — алюминий): для монтажа сваркой (слева) и для монтажа пайкой (справа)

Готовые микросхемы поставляются либо в виде сборочных лент, на которых бракованные ИС помечены или вырублены (ленты сформированы из материалов на основе меди), либо в виде дискретных компонентов, помещенных в специальную тару-спутник (рис. 3), допускающую проведение контроля и технологических отбраковочных испытаний (выводы ГПН изготовлены из алюминия), в том числе электротермотренировки при необходимости.

Характеристики ГПН и наиболее распространенных методов их получения приведены в таблице.

Учет всех свойств и особенностей изготовления кристаллов, гибких полиимидных носителей и сборки микросхем позволяет выделить в качестве наиболее приемлемого, по нашему мнению, метод изготовления двухслойных гибких носителей типа «алюминий — полиимид», который наиболее близок к так называемому идеальному гибкому носителю (см. таблицу).

Используя этот метод можно [11]:

- обеспечить высокую надежность после герметизации в составе микросборок за счет образования монометаллического соединения Al—Al при сварке на кристалле и большего поперечного сечения выводов ГПН в сравнении с проволочными соединениями, что делает их более прочными и облегчает отвод тепла от кристалла;
- практически исключить в отличие от проволочных проводников возможность короткого замыкания выводов за счет их закрепления на механически прочной полиимидной пленке, что особенно актуально для микросхем, работающих в условиях больших ускорений и ударных нагрузок;

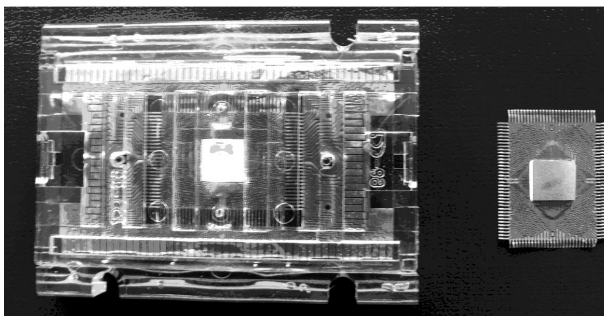


Рис. 3. Микросхема на гибком полиимидном носителе в таре-спутнике (слева) и монтажная часть микросхемы перед установкой на плату (пассивную подложку ГИС) (справа)

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Особенности проведения сборочных операций изделий с использованием различных модификаций ГПН в сравнении с идеальным ГПН

Свойства и особенности изготовления изделий	Структурное строение гибких носителей						Идеальный ГПН
	Однослойные		Двухслойные		Трехслойные (с адгезивом)		
	Cu	Al	Cu — полиимид	Al — полиимид	Cu — полиимид	Al — полиимид	
Чипы							
модификация техпроцесса изготовления	+	—	+	—	+	—	—
применение драгметаллов и остродефицитных материалов	+	—	+	—	+	—	—
Гибкие носители							
обеспечение высокой радиационной стойкости	—	+	—	+	—	±	+
широкий диапазон рабочих температур	+	+	+	+	—	—	+
возможность изготовления многослойных ГПН	—	—	+	+	+	+	+
сохранение плоскостности выводов при сборке	—	—	+	+	+	+	+
исключение замыкания на край кристалла	—	—	+	+	+	+	+
необходимость защиты поверхности выводов	+	—	+	—	+	—	—
возможность контроля сопротивления изоляции до сборки	—	—	+	+	+	+	+
необходимость в оборудовании для штамповки, нанесения адгезива и дублирования	—	—	—	—	+	+	—
необходимость травления полиимида	—	—	+	+	—	—	—
относительная дешевизна	+	+	+	+	—	±	+
возможность вакуумного нанесения дополнительных слоев металлов	+	+	+	+	±	±	+
Микросхемы							
исключение образования интерметаллидов	—	+	—	+	—	+	+
контроль электропараметров до вырубки	—	—	+	+	+	+	+
технологические отбраковочные испытания, в том числе электротермотренировки	—	—	+	+	+	+	+
монтаж сваркой или пайкой по выбору потребителя	—	±	—	+	—	±	+
автоматизация процессов сборки	—	—	+	+	+	+	+

Примечание: «+» требование выполняется; «—» требование не выполняется; «±» требуется доработка

— обеспечить возможность монтажа в микроэлектронную аппаратуру (**МЭА**) как ультразвуковой сваркой, так и пайкой после дополнительной обработки алюминиевых выводов [4];

— обеспечить возможность сборки на одном ГПН (микрокабеле) типа «алюминий — полиимид» нескольких кристаллов, в том числе с различным количеством выводов и шагом контактных площадок [9];

— повысить плотность монтажа МЭА за счет уменьшения ширины выводов ГПН до

30 — 40 мкм и шага контактных площадок до 80 мкм [9, 10];

— обеспечить возможность сборки многослойных БИС и СБИС, имеющих сотни выводов, когда применение традиционной проволочной сборки затруднено, в то время как использование многослойных ГПН не вызывает особых проблем и допускает использование сборочных автоматов;

— обеспечить возможность использования ГПН при сборке БИС и СБИС, работающих в

условиях радиационных нагрузок, благодаря исключительно высокой радиационной стойкости полиимида и алюминия.

\*\*\*

Таким образом, проведенный анализ показал, что гибкие носители типа «алюминий — полиимид» имеют существенное преимущество в сравнении с другими конструкциями и обеспечивают высокую надежность микросхем в составе герметичных микросборок, а также в электронной аппаратуре, работающей при больших ускорениях и ударных нагрузках. Оправдано также использование таких ГПН при сборке ИС, работающих в условиях радиационных нагрузок. Применение микросхем на ГПН в бытовой МЭА возможно после герметизации полимерными материалами и защиты поверхности плат. В случаях многовыводных БИС и СБИС, имеющих сотни выводов, методы сборки микросхем на ГПН практически не имеют альтернативы.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гуськов Г. Я., Блинов Г. А., Газаров А. А. Монтаж микроэлектронной аппаратуры. — Москва: Радио и связь, 1986. [Gus'kov G. Ya., Blinov G. A., Gazarov A. A. Montazh mikroelektronnoy apparatury. Moscow: Radio i svyaz', 1986.]
2. Воженин И. Н., Блинов Г. А., Коледов Л. А. и др. Микроэлектронная аппаратура на бескорпусных интегральных микросхемах. — Москва: Радио и связь, 1985. [Vozhenin I. N., Blinov G. A., Koledov L. A. i dr. Mikroelektronnaya apparatura na beskorpusnykh integral'nykh mikroskhemakh. Moscow: Radio i svyaz', 1985]
3. Бельский В. З., Сейсян Р. П., Шубина Т. В. БГИС модули — новая элементная база широкоэмиттерных телевизионных приемников // Электронная промышленность. — 1980. — № 4. — С. 17—22. [Belen'skii V. Z., Seisyans R. P., Shubina T. V. // Elektronnaya promyshlennost'. 1980. N 4. P. 17]
4. А. с. 1 781 733 СССР. Способ сборки интегральных схем // А. Г. Шеревеня, И. А. Тучинский, В. Д. Жора. — 1992. — Бюл. № 46. [A. s. 1 781 733 USSR // A. G. Sherevenya, I. A. Tuchinskii, V. D. Zhora. 1992. Byul. N 46]
5. Бессонов М. И., Котон М. М., Кудрявцев В. В., Лайус Л. А. Полиимиды — класс термостойких полимеров. — Ленинград: Наука, 1983. [Bessonov M. I., Koton M. M., Kudryavtsev V. V., Laius L. A. Poliimidy — klass termostoikhikh polimerov. Leningrad: Nauka, 1983]
6. Гаврюшин Н. Н. Методы изготовления гибких печатных плат и кабелей // Зарубежная радиоэлектроника. — 1985. — № 5. — С. 51—63. [Gavryushin N. N. // Zarubezhnaya radioelektronika. 1985. N 5. P. 51]
7. Борщев В. Н., Листратенко А. М., Антонова В. А. и др. Светодиодные модули на основе алюминиевой «chip on flex» (COF) технологии // Світлотехніка та електроенергетика. — 2008. — № 4. — С. 31—37. [Borshchev V. N., Listratenko A. M., Antonova V. A. i dr. // Svitlotekhnika ta elektroenergetika. 2008. N 4. P. 31]
8. Плис Н. И., Вербицкий В. Г., Жора В. Д. и др. Технология сборки микросхем на гибком полиимидном носителе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010. — № 5—6 (89). — С. 43—45. [Plis N. I., Verbitskii V. G., Zhora V. D. i dr. // Tekhnologiya i

Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2010. N 5—6 (89). P. 43]

9. Перевертайло В. Л., Жора В. Д., Грунянская В. П. и др. Применение гибких носителей при сборке кремниевых детекторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 1 (79). — С. 40—44. [Perevertailo V. L., Zhora V. D., Grun'yanskaya V. P. i dr. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. 2009. N 1 (79). P. 40]

10. Борщев В. Н., Антонова В. А., Листратенко А. М. и др. Комплексный подход к выбору конструктивно-технологических решений гибко-жестких однодетекторных модулей для комптоновской медицинской томографии / В сб. Сцинтилляционные материалы. Инженерия, устройства, применение. — Харьков: «ИСМА», 2009. — С. 111—127. [Borshchev V. N., Antonova V. A., Listratenko A. M. i dr. / V sb. Stsintillyatsionnye materialy. Inzheneriya, ustroystva, primeneniye. Khar'kov: «ISMA», 2009. P. 111]

11. Плис Н. И., Вербицкий В. Г., Волнистов В. Н. и др. Преимущества сборки микросхем на гибком полиимидном носителе // Тр. 11-й Междунар. научн.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, г. Одесса. — 2010. — Т. II. — С. 51. [Plis N. I., Verbitskii V. G., Volnistov V. N. i dr. // Tr. 11-i Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. «Modern information and electronic technologies». Ukraine, Odessa. 2010. Vol. II. P. 51]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 03.06 2013 г.*

Verbitskiy V. G., Plis N. I., Zhora V. D., Grun'yanskaya V. P. **Comparative analysis of methods for the microcircuit assembly on flexible polyimide carriers.**

*Keywords: assembly of chips, a flexible polyimide carrier, connections.*

The article presents a classification of methods for the microcircuit assembly with the use of flexible polyimide carriers of different types, and their comparative analysis. The most appropriate method for the manufacturing of flexible dual-layer carriers is singled out.

Ukraine, Kiev, Institute of Microdevices of NASU; Russia, Moscow, JSC «Angstrom».

Вербицкий В. Г., Плис М. И., Жора В. Д., Грунянская В. П. **Порівняльний аналіз методів складання мікросхем на гнучких поліімідних носіях.**

*Ключові слова: складання мікросхем, гнучкий поліімідний носій, якість з'єднань.*

Наведено класифікацію методів складання мікросхем з використанням гнучких поліімідних носіїв різних типів, проведено їх порівняльний аналіз. Виділено найбільш прийнятний метод виготовлення двошарових гнучких носіїв.

Україна, м. Київ, НДІ мікроприладів НАНУ; Росія, м. Москва, ВАТ «Ангстрем».

УДК 534.8:621.396.6

Д. т. н. В. Л. ЛАНИН<sup>1</sup>, И. Б. ПЕТУХОВ<sup>2</sup>Беларусь, г. Минск, <sup>1</sup>БГУИР, <sup>2</sup>КБТЭМ-СО ГНПО «Планар»

E-mail: vlanin@bsuir.by, petuchov@kbtem.by

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ УЗ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

*Предложена методика расчета параметров полуволновых пакетных УЗ-пьезоизлучателей и ступенчатых волноводов, обладающая погрешностью не более 6–8%, которая может быть достаточно эффективно использована для проектирования ультразвуковых преобразователей различных конструкций в широком диапазоне частот в силу своей простоты, удобства применения и малых затрат.*

**Ключевые слова:** пьезокерамический излучатель, волновод, расчет параметров, импеданс, микросварка.

В современных установках микросварки проводочных выводов в изделиях электронной техники ультразвуковая (УЗ) система, состоящая из УЗ-генератора (УЗГ) и УЗ-преобразователя (УЗП), играет ключевую роль в стабильности работы установки и воспроизводимости качества сварных соединений, особенно при сборке приборов с повышенной плотностью монтажа и с использованием проводников малого сечения. УЗ-генератор формирует на выходе программируемый по амплитуде и длительности переменный сигнал ультразвуковой частоты, поступающий на УЗ-преобразователь, который преобразует подводимую электрическую энергию в энергию механических колебаний на резонансной частоте. Работа большинства УЗП в установках микросварки основана на обратном пьезоэффекте используемых пьезокерамических материалов в виде колец или пластин. К основным параметрам УЗ-преобразователей относятся стабильность частоты резонанса в процессе эксплуатации, величина импеданса на резонансной частоте и форма частотных зависимостей модуля и фазы импеданса.

Современный УЗП для установок микросварки имеет импеданс 10–30 Ом на резонансной частоте, которая находится в диапазоне от 60 до 240 кГц. Низкий импеданс позволяет значительно упростить выходной каскад УЗ-генератора при согласовании нагрузки. УЗ-преобразователи повышенной частоты (с частотой резонанса более 100 кГц) применяются преимущественно в установках термозвуковой сварки методом «шарик — клин», что позволяет повысить производительность за счет сокращения времени сварки, а также уменьшить температуру зоны сварки [1]. Возможность снижения температуры зоны микросварки особенно актуальна при сборке при-

боров на полимерных носителях, например кредитных карт, SIM карт и т. п.

УЗ-преобразователь состоит из трех основных частей (рис. 1): пьезокерамического излучателя, волновода и крепежного стакана, расположенного в узле продольных колебаний. При соединении пьезоизлучателя с волноводом необходимо обеспечить такие условия, чтобы частота резонанса системы «пьезоизлучатель — волновод» оставалась равной резонансной частоте излучателя. Поэтому проектирование УЗ-системы включает в себя расчет геометрических размеров составных частей УЗ-преобразователя на заданную частоту с учетом конструктивных особенностей сварочной головки установки микросварки. Анализ амплитудно-частотной характеристики рассчитываемого УЗ-преобразователя выполняется с помощью измерительных стендов или программных средств компьютерного моделирования. Очевидно, что предварительное моделирование с помощью программных средств позволит избежать дорогостоящих производственных затрат на исправление конструкторских ошибок на этапе проектирования.



Рис. 1. Ультразвуковой преобразователь установки микросварки выводов



В настоящей работе предложена методика расчета параметров основных частей УЗ-преобразователей, которая может быть использована для расчета и анализа преобразователей различных конструкций в широком диапазоне частот.

### Расчет параметров пьезокерамического излучателя

Пьезокерамический излучатель представляет собой несколько стянутых металлическими накладками пьезокерамических колец, электрически соединенных параллельно.

Круговую частоту  $\omega$  механического резонанса пьезоизлучателя можно определить из соотношения [2]

$$\frac{\omega l_2}{c_2} + \arctg\left(\frac{\rho_1 S_1 c_1}{\rho_2 S_2 c_2} \operatorname{tg} \frac{\omega l_1}{c_1}\right) + \arctg\left(\frac{\rho_3 S_3 c_3}{\rho_2 S_2 c_2} \operatorname{tg} \frac{\omega l_3}{c_3}\right) = \pi, \quad (1)$$

где  $l_i$ ,  $\rho_i$ ,  $c_i$ ,  $S_i$  — соответственно длина, плотность материала, скорость звука в нем и площадь поперечного сечения тыльной накладки ( $i=1$ ), секции пьезокерамики ( $i=2$ ) и передней накладки ( $i=3$ ) (рис. 2).

Расчет частоты пьезоизлучателя по этой формуле проводился в математическом пакете MathCAD при следующих исходных данных:

- секция пьезокерамики состоит из четырех колец толщиной 2 мм, внешний диаметр 12 мм, внутренний 5 мм, материал ЦТС-43 ( $l_2=8$  мм,  $S_2=374$  мм<sup>2</sup>,  $\rho_2=7500$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_2=3200$  м/с [3]);

- накладки имеют форму цилиндра диаметром 12,8 мм и высотой 8,5 мм, материал сталь ( $l_1=l_3=8,5$  мм,  $S_1=S_3=130$  мм<sup>2</sup>,  $\rho_1=\rho_3=7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_1=c_3=5100$  м/с).

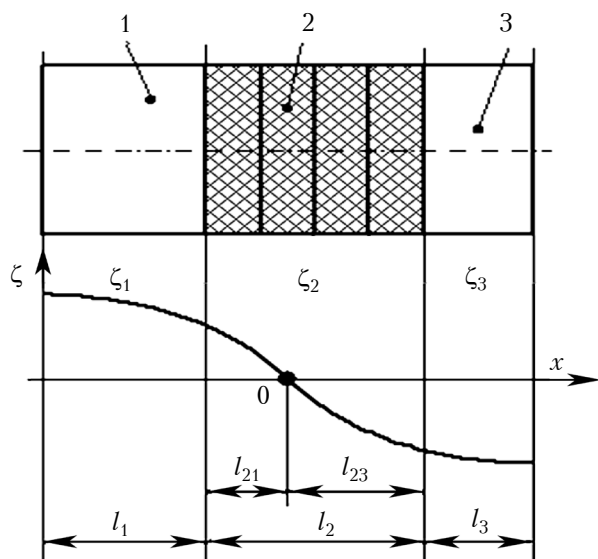


Рис. 2. Распределение амплитуды колебаний в полуволновом пьезоизлучателе:

1 — тыльная накладка; 2 — секция пьезокерамики; 3 — передняя накладка

В результате расчета было получено значение резонансной частоты пьезоизлучателя 64,141 кГц.

Измерения, проведенные на специальном стенде [4] для пяти образцов пьезоэлектрических излучателей показали, что их резонансная частота находится в диапазоне от 61,5 до 66,4 кГц, т. е. отклонение от расчетной частоты не превышает 8%.

Из анализа соотношения (1) можно заключить, что при уменьшении длины накладок частота пьезоизлучателя увеличивается. Например, при той же длине пьезосекции 8 мм уменьшение длины накладок с 8,5 до 3,2 мм приводит к росту частоты до 102 кГц. Очевидно, что для более высоких частот необходимо использовать пьезокольца меньшей толщины для обеспечения технологичности конструкции.

Приведенный расчет пригоден только для первоначальной оценки резонансной частоты, поскольку он не учитывает различные моды колебаний, которые могут возникать при определенных соотношениях геометрических размеров составных частей пьезоизлучателя, усилия сжатия пакета и др. К нежелательным модам колебаний относятся поперечные и крутильные колебания, которые, распространяясь по волноводу УЗ-преобразователя к месту зажима микроинструмента, могут вызвать сложные колебания его рабочего торца, что в свою очередь может сказаться на качестве сварных соединений [5].

Эта проблема больше всего проявляется при разработке УЗП повышенной частоты (более 100 кГц), поскольку, как указывалось выше, для них нужно использовать составляющие компоненты меньших геометрических размеров. В этом случае оценить выходные характеристики УЗП можно методом лазерной виброметрии, позволяющим дистанционно измерять амплитуду и спектр механических колебаний рабочего торца микроинструмента [6].

В симметричном полуволновом пьезоизлучателе узел колебаний находится посередине пьезокерамической секции, поэтому здесь возникают наибольшие внутренние напряжения. Чтобы увеличить надежность пьезокерамики при высокой подводимой мощности, желательно сместить узел колебаний ближе к границе пьезокерамической секции с передней накладкой, например: тыльная накладка вместе с секцией пьезокерамики образует четвертьволновой излучатель с узлом колебаний на границе пьезокерамики с передней накладкой, выполненной в виде четвертьволнового трансформатора, который обеспечивает необходимый коэффициент усиления. Очевидно, что в таком случае частотопонижающие накладки будут иметь разную длину, и тогда судить о положении узла колебаний по выражению (1) довольно сложно. Поэтому для определения размеров накладок и, соответственно, положения секций пьезокерамики относительно узла колебаний воспользуемся уравнением продольных колебаний [7]

$$\frac{\partial^2 \zeta(x, t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 \zeta(x, t)}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где  $\zeta(x, t)$  — функция распределения амплитуды колебаний;

$c$  — скорость звука в материале;

$x, t$  — координата и время распространения продольных колебаний соответственно.

Обычно решение такого уравнения в общем виде находят как

$$\zeta(x, t) = \left[ A \cos \frac{\omega}{c} x + B \sin \frac{\omega}{c} x \right] \sin \omega t. \quad (3)$$

Чтобы получить отсюда выражения для расчета длины накладок, составим граничные условия согласно рис. 2.

На границах секции керамики с накладками справедливы следующие равенства амплитуд и сил сжатия и растяжения:

— при  $x = -l_{21}$

$$\zeta_1 = \zeta_2, \quad (4)$$

$$E_1 S_1 \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} = E_2 S_2 \frac{\partial \zeta_2}{\partial x}; \quad (5)$$

— при  $x = l_{23}$

$$\zeta_2 = \zeta_3, \quad (6)$$

$$E_2 S_2 \frac{\partial \zeta_2}{\partial x} = E_3 S_3 \frac{\partial \zeta_3}{\partial x}; \quad (7)$$

где  $E_i$  — модуль Юнга для материала тыльной накладки ( $i=1$ ), пьезокерамики ( $i=2$ ) и передней накладки ( $i=3$ ).

На торцах полуволнового излучателя значения амплитуды колебаний достигают своих максимальных значений и, следовательно, их производные равны нулю, то есть:

— при  $x = -l_{21} - l_1$

$$\frac{\partial \zeta_1}{\partial x} = 0; \quad (8)$$

— при  $x = l_{23} + l_3$

$$\frac{\partial \zeta_3}{\partial x} = 0. \quad (9)$$

С использованием этих соотношений были проведены соответствующие преобразования, в результате которых получены следующие формулы для определения длины накладок:

$$l_1 = \frac{c_1}{\omega} \arctg \frac{Z_1 \sin \frac{\omega}{c_1} l_{21} + \cos \frac{\omega}{c_1} l_{21}}{Z_1 \cos \frac{\omega}{c_1} l_{21} - \sin \frac{\omega}{c_1} l_{21}} - l_{21}, \quad (10)$$

$$l_3 = \frac{c_3}{\omega} \arctg \frac{Z_3 \sin \frac{\omega}{c_3} l_{23} + \cos \frac{\omega}{c_3} l_{23}}{Z_3 \cos \frac{\omega}{c_3} l_{23} - \sin \frac{\omega}{c_3} l_{23}} - l_{23}, \quad (11)$$

где

$$Z_1 = \frac{E_1 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_1} \operatorname{tg} \left( \frac{\omega}{c_2} l_{21} \right);$$

$$Z_3 = \frac{E_3 S_3 c_2}{E_2 S_2 c_3} \operatorname{tg} \left( \frac{\omega}{c_2} l_{23} \right).$$

Значения длины стальных накладок диаметром 12,8 мм, рассчитанные по формулам (10) и (11) для указанных выше размеров секции пьезокерамики ЦТС-43 (четыре кольца диаметром 12 мм и толщиной 2 мм) при резонансной частоте пьезоизлучателя 92 кГц, составили 4 мм для тыльной накладки и 4,2 мм для передней. Результаты испытаний партии излучателей (10 штук) с такими размерами показали разброс по частоте  $\pm 2$  кГц относительно заложенной в расчете величины, что можно считать достаточно хорошим согласованием.

### Расчет параметров составного волновода

Волновод является нагрузкой пьезоизлучателя и соединяется с ним посредством резьбовой шпильки. Конструкция классического волновода представлена на рис. 3. Здесь имеется три секции: первая, длиной  $l_1$ , имеет форму цилиндра диаметром  $d_1$ ; вторая, длиной  $l_2$ , — переменного сечения; третья, длиной  $l_3$ , — цилиндрическая, диаметром  $d_2$ . Первая секция соединяется с накладкой пьезоизлучателя, в третьей производят зажим микроинструмента. Вторая секция может быть выполнена в виде конуса, экспоненты или катеноида, однако очевидно, что с точки зрения изготовления наиболее технологичным является конус. Вся конструкция для исключения акустических потерь выполняется как одно целое.

Ступенчатый волновод представляет для пьезоизлучателя комплексную нагрузку, реактивная часть которой на резонансной частоте должна быть равна нулю. Для частотного анализа составного волновода воспользуемся соотношениями для входных импедансов каждой секции волновода [8], при этом будем учитывать, что третья секция является нагрузкой для второй секции с переменным сечением, которая, в свою очередь, является нагрузкой для первой части волновода.

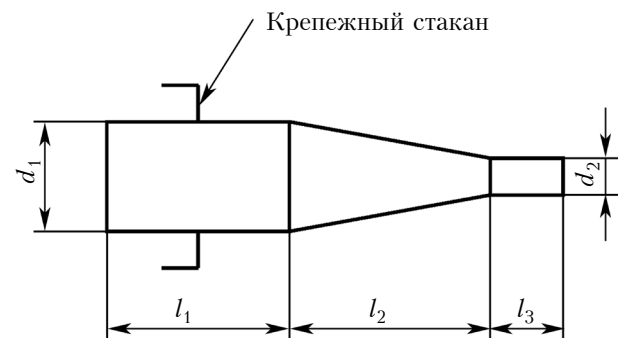


Рис. 3. Конструкция ступенчатого волновода

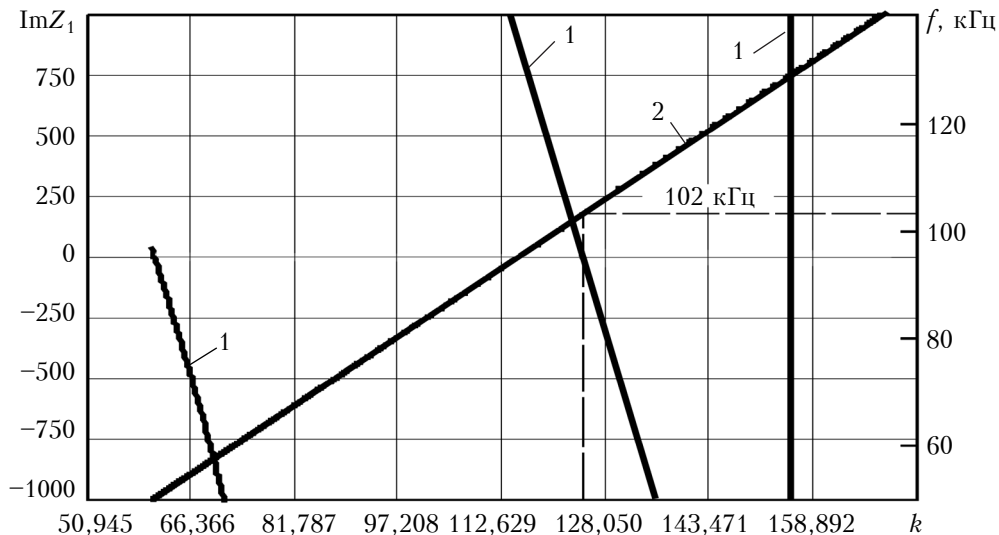


Рис. 4. Зависимости мнимой части импеданса (1) и резонансной частоты (2) ступенчатого волновода, выполненного из стали ( $d_1=7$  мм;  $d_2=3,5$  мм;  $l_1=49,6$  мм;  $l_2=39$  мм;  $l_3=6$  мм), от волнового числа  $k$

В приведенных далее выражениях, описывающих входные импедансы, нагрузка соответствующей секции волновода будет обозначаться как  $Z_{Li}$ , а ее акустический импеданс —  $Z_{ci}$  ( $Z_{ci}=\rho S_i c$ , где  $S_i$  — площадь поперечного сечения секции;  $\rho$ ,  $c$  — плотность материала и скорость звука в нем).

Входной импеданс третьей секции  $Z_3$  описывается следующим соотношением [8]:

$$Z_3 = \frac{Z_{L3} + jZ_{c3} \operatorname{tg} kl_3}{1 + j \frac{Z_{L3}}{Z_{c3}} \operatorname{tg} kl_3}, \quad (12)$$

где  $k$  — волновое число,  $k=2\pi f/c$ ;  
 $f$  — частота.

Для дальнейшего анализа будем считать, что третья секция волновода находится без нагрузки, т. е.  $Z_{L3}=0$ , и тогда выражение (12) сведется к следующему:

$$Z_3 = jZ_{c3} \operatorname{tg} kl_3. \quad (13)$$

Примем, что вторая секция имеет форму конуса и введем следующие обозначения:

$$M=d_1/d_2; \beta=(M-1)/(Ml_2); b_1=\beta/k;$$

$$b_2=\beta(M-1)/k; b_3=1+M\beta^2/k^2; b_4=M\beta/k.$$

Тогда входной импеданс второй секции будет описываться как

$$Z_2 = \frac{jZ_{c2}[-b_2 \cos kl_2 + b_3 \sin kl_2] + Z_{L2} M^2 [\cos kl_2 - b_1 \sin kl_2]}{\cos kl_2 - b_4 \sin kl_2 + j \frac{Z_{L2}}{Z_{c2}} M^2 \sin kl_2}. \quad (14)$$

Поскольку нагрузкой  $Z_{L2}$  этой секции является входной импеданс третьей секции  $Z_3$ , т. е.  $Z_{L2}=Z_3$ , подставим соотношение (13) в (14) и получим

$$Z_2 = \frac{jZ_{c2}[-b_2 \cos kl_2 + b_3 \sin kl_2] + Z_3 M^2 [\cos kl_2 - b_1 \sin kl_2]}{\cos kl_2 - b_4 \sin kl_2 + j \frac{Z_3}{Z_{c2}} M^2 \sin kl_2}. \quad (15)$$

Импеданс  $Z_2$ , в свою очередь, является нагрузкой для первой части волновода, т. е.  $Z_{L1}=Z_2$ . Тогда с учетом этого и на основании выражения (12) для импеданса цилиндрической части получим выражение для общего импеданса волновода в следующем виде:

$$Z_1 = \frac{Z_2 + jZ_{c1} \operatorname{tg} kl_1}{1 + j \frac{Z_2}{Z_{c1}} \operatorname{tg} kl_1}. \quad (16)$$

С учетом того, что входной импеданс волновода  $Z_1$  является комплексной величиной, частотный анализ проводится графически с отображением мнимой части импеданса  $\operatorname{Im} Z_1$ .

На рис. 4 приведены графики, из которых видно, что кривая импеданса пересекает нуль в точке, которая соответствует резонансной частоте 102 кГц, т. е. на этой частоте волновод указанных размеров должен быть согласован с пьезоизлучателем. Фактическая резонансная частота УЗ-преобразователя, изготовленного в соответствии с проведенными расчетами, получилась равной 100,6 кГц.

\*\*\*

Предложенная методика расчета параметров полуволнового пакетного УЗ-пьезоизлучателя повышенной частоты и ступенчатого волновода, имеет погрешность не более 6—8%. Несмотря на то, что это несколько больше, чем погрешность, которую обеспечивают коммерческие программные продукты типа ANSYS (3,5—5,0%), предложенная методика может быть достаточно эффективно использована для проектирования кон-

струкций УЗП и составных волноводов в широком диапазоне частот в силу своей простоты, удобства применения и малой стоимости.

# ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Parrini L. Advanced process characterization for 125 kHz wire bonder ultrasonic transducer // IEEE Transactions on components and packaging technologies. — 2002. — Vol. 25, N 3. — P. 486–494. — DOI: 10.1109/TCAPT.2002.803658
2. Chilibon I., Wevers M., Lafaut J.-P. Ultrasound underwater transducer for extracorporeal shock wave lithotripsy // Romanian Reports in Physics. — 2005. — Vol. 57, N 4. — P. 979–992.
3. <http://www.elpapiezo.ru/rus/piezoceramic/material/powerultrasound.html>
4. Ланин В., Петухов И., Федоров Н. Настройка ультразвуковых колебательных систем микросварки соединений в электронике // Технологии в электронной промышленности. — 2011. — № 50. — С. 66–70. [Lanin V., Petukhov I., Fedorov N. // Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti. 2011. N 50. P. 66]
5. Parrini L. New techniques for the design of advanced ultrasonic transducers for wire bonding // IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing. — 2003. — Vol. 26, N 1. — P. 37–45. — DOI: 10.1109/TEPM.2003.813001
6. Ланин В., Петухов И., Мордвинцев Д. Повышение качества микросварных соединений в интегральных схемах с использованием ультразвуковых систем повышенной частоты // Технологии в электронной промышленности. — 2010. — № 1. — С. 48–50. [Lanin V., Petukhov I., Mordvintsev D. // Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti. 2010. N 1. P. 48]
7. Теумин И. И. Простые стержневые колебательные системы // В кн.: Ультразвуковые колебательные системы. — Москва: МАШГИЗ, 1959. — С. 87–97. [Teumin I. I. Prostye stержnevye kolebatel'nye sistemy // V kn.: Ul'trazvukovye kolebatel'nye sistemy. — Moscow: MASHGIZ, 1959. P. 87]
8. McBrearty M., Kim L. H., Bilgutay N. M. Analysis of impedance loading in ultra-sonic transducer systems // Ultrasonic Symposium. — 1988. — P. 497–502.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 08.04 2013 г.

V. L. Lanin, I. B. Petukhov. **Method of calculating the parameters of ultrasonic super-high-frequency transducers**

*Keywords: piezoceramic radiator, waveguide, calculation of parameters, impedance, microwelding.*

The paper presents a method of calculating the parameters of half-wave package ultrasonic piezoelectric emitters and step waveguides, which has an error no more than 6–8%. This method, owing to its simplicity, usability and low cost, can be effectively used for the design of ultrasonic transducers of different designs in a wide range of frequencies.

Belarus, Minsk, BHUIR, KBTEM-CO GNPO «Planar».

В. Л. Ланин, И. Б. Петухов. **Методика розрахунку параметрів УЗ-перетворювачів підвищеної частоти.**

*Ключові слова: п'єзокерамічний випромінювач, хвилевід, розрахунок параметрів, імпеданс, мікрозварювання.*

Запропоновано методику розрахунку параметрів напівхвильових пакетних УЗ-п'єзовипромінювачів і ступінчатих хвилеводів, що має похибку не більше 6–8%. Методика може бути досить ефективно використана для проектування ультразвукових перетворювачів різних конструкцій в широкому діапазоні частот через свою простоту, зручність застосування та малі витрати.

Білорусь, м. Мінськ, БГУІР, КБТЕМ-СО ГНПО «Планар».

## НОВЫЕ КНИГИ

### НОВЫЕ КНИГИ



**Бард Дж., Коварик В. Дж.-мл. Архитектура сетей связи на базе программируемых радиосредств.— Москва: Техносфера, 2013.**

В книге рассматриваются проблемы и преимущества, связанные с развитием радиосистем в соответствии со спецификацией SCA (архитектуры программируемых средств связи). Она представляет собой всеобъемлющее практическое введение в построение SCA-совместимых систем и помогает читателю освоить исторические и концептуальные основы, заполнить пробел между целью, содержащейся в спецификации SCA, и практическим воплощением. Книга предназначена для программистов, конструкторов, профессиональных исследователей, производителей и операторов беспроводной связи, а также для студентов старших курсов и аспирантов, изучающих мобильную и беспроводную связь.





## РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

- Баранов Валентин Владимирович*, докт. техн. наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск
- Бондаренко Александр Федорович*, канд. тех. наук, доцент, Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск
- Данилов Владимир Васильевич*, докт. техн. наук, заведующий кафедрой, Донецкий национальный университет
- Лугин Александр Николаевич*, канд. тех. наук, начальник отдела, ФГУП «НИИ Электронно-механических приборов», г. Пенза
- Максименко Юрий Николаевич*, канд. техн. наук, заместитель директора, ЗАО «Украналит», г. Киев
- Николаенко Юрий Егорович*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НТУУ «Киевский политехнический институт»
- Николенко Анатолий Александрович*, канд. тех. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Петлицкий Александр Николаевич*, канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории, Завод полупроводниковых приборов НПО «Интеграл», г. Минск
- Плаксин Сергей Викторович*, докт. физ.-мат. наук, заведующий отделом, Институт транспортных систем и технологий НАНУ, г. Днепропетровск
- Смольский Сергей Михайлович*, докт. техн. наук, заведующий кафедрой, профессор, заместитель директора, Институт радиотехники и электроники МЭИ, г. Москва
- Старжинский Николай Григорьевич*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Институт сцинтилляционных материалов НАНУ, г. Харьков
- Томашик Василий Николаевич*, докт. хим. наук, ученый секретарь, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Трофимов Владимир Евгеньевич*, канд. тех. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Цопа Александр Иванович*, докт. техн. наук, старший научный сотрудник Харьковского национального университета радиоэлектроники

## ПАМЯТКА АВТОРУ ЖУРНАЛА «ТКЭА»

1. К рассмотрению принимаются статьи прикладной направленности на русском или английском языке, которые не были опубликованы ранее и не переданы для публикации в другие издания.
2. В журнале публикуются результаты научно-практических и экспериментальных работ по тематическим направлениям, перечисленным на сайте журнала.
3. Все поступающие к рассмотрению материалы проходят двухсторонне-закрытое рецензирование.
4. При обнаружении плагиата или фальсификации результатов статья отклоняется.
5. Редакция не взимает плату за опубликование рукописи и не выплачивает авторский гонорар. Экземпляр журнала с опубликованной статьей высылается авторам по почте.
6. Обязательным условием для принятия статьи к печати является ее соответствие общепринятым нормам построения научной публикации, то есть наличие в ней:
  - постановки проблемы в общем виде с указанием ее связи с важными научными или практическими задачами;
  - анализа последних достижений и публикаций, в которых рассматривается описанная проблема, с выделением той ее части, решению которой посвящена данная статья;
  - цели статьи (постановки задачи);
  - основного материала с обсуждением и интерпретацией полученных результатов;
  - выводов, а также указания на перспективы проведения исследований в данном направлении.

Кроме этого, при оценке рукописи редакцию будут интересовать следующие аспекты:

- возможность практического применения;
- целесообразность таблиц, иллюстраций, списка использованных источников;
- строгость терминологии;
- композиция рукописи, в т. ч. оправданность объема.

7. Статья должна быть четко структурирована, а поставленная задача, выводы и название — согласованы между собой.

8. При написании статьи следует обратить внимание на следующее:

- название рукописи должно быть конкретным, информативным и, в то же время, по возможности кратким;
- аннотация должна быть достаточно лаконичной (от 30 до 60 слов) и в то же время информативной, соответствовать содержанию статьи и показывать, что сделано в работе;
- ключевые слова должны быть подобраны так, чтобы вероятность нахождения статьи через поисковые системы была как можно выше;
- описание результатов, представленных на рисунках, должно включать в себя интерпретацию этой информации, а не сводиться к дублированию подрисовочных подписей или к простому описанию приведенных зависимостей. Например, вместо таких неинформативных фраз, как «На рис. 1 приведен график зависимости А от В. Из рисунка видно, что при возрастании В значение А монотонно уменьшается.», следует дать пояснение типа «Как видно из рис. 1, при возрастании В значение А монотонно уменьшается, что свидетельствует о том, что ...»;
- выводы (заключение) не должны повторять аннотацию — в них нужно показать, что получено в работе, кратко и четко сформулировать результаты работы, а не приводить краткое содержание статьи. (Правильно сформулировать выводы помогут такие фразы, как «Проведенное исследование показало, что ...», «Разработанная методика позволяет ...», «Авторами установлено, что ...» и др.)

9. Список «Использованные источники» (образец см. на сайте) формируется в порядке их упоминания в тексте. При этом нужно иметь в виду следующее:

- обязательно наличие ссылок на статьи и монографии последних лет, в том числе зарубежных авторов;
- не рекомендуется включать в список литературы ссылки на такие нормативные документы, как указы, акты и т. п. — если без этого нельзя обойтись, лучше упомянуть их не посредственно в тексте статьи;
- желательно избегать ссылок на труднодоступные публикации или на недолговечные Интернет-источники;
- при ссылке в тексте на численные значения, формулы и иные фактические данные, заимствованные из книг, следует указывать не только саму книгу, но и страницу (например, [2, с. 418]);

— количество источников не должно быть неоправданно большим: для подтверждения какого-либо факта достаточно одной-двух ссылок.

10. Редакция не предъявляет жестких требований к объему статьи — главное, чтобы он был оправдан. Как правило, публикации в «ТКЭА» занимают от двух до шести журнальных страниц, что соответствует 5—15 страницам, набранным в текстовом редакторе Microsoft Word, шрифт Times New Roman, размер 12, междустрочный интервал 1,5.

11. При наборе текста статьи допускается использование программ типа MathType только в тех случаях, когда Word бессилен, например при наборе специальных знаков над буквенными обозначениями, подкоренных выражений, пределов интегрирования, суммирования и т. п.

12. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а терминология соответствовать общепринятой. Все использованные символы и аббревиатуры нужно пояснить при первом их упоминании в тексте.

13. С точки зрения удобства верстки желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% от общего объема статьи.

14. Название статьи, ФИО авторов, аннотацию и ключевые слова нужно представить на русском, украинском (по возможности) и английском языках в конце статьи.

15. В начале статьи необходимо указать ее индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК).

16. Материалы статьи, вместе с подписанным Авторским соглашением и информацией об авторах (см. на сайте), направляются по e-mail <tkea@optima.com.ua>.

P.S. Для контроля выполнения требований к содержанию статьи авторы могут воспользоваться критериями, по которым рукопись будет оцениваться рецензентом (см. бланк рецензии на сайте).



Выставка «Силовая Электроника» демонстрирует полный спектр разработок и готовых решений в области силовой электроники для энергетики и энергосбережения, транспортного машиностроения, военно-промышленного комплекса и других секторов экономики

### РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ

- Датчики и сенсоры
- Интегральные микросхемы и оптоэлектроника
- Интеллектуальный контроль двигателей
- Контроль качества электропитания
- Магниты и материалы сердечников
- Пассивные компоненты
- Преобразователи напряжения
- Программное обеспечение
- Сервомоторы и актюаторы
- Силовые полупроводниковые приборы
- Системы автоматизации
- Тестирование и измерение
- Технологии энергоэффективности и энергосбережения
- Транзисторы, трансформаторы
- Узлы и сборки
- Управление тепловыделением
- Электроэнергетика

Специальный раздел:

- Источники питания и батареи



Москва, 65—66 км МКАД, МВЦ «Крокус Экспо»  
<http://power.primexpo.ru/ru/profile>

10-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА  
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

26—28  
НОЯБРЯ 2013  
МОСКВА,  
КРОКУС ЭКСПО





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

# AISS-Automatica-2013

Автоматизация: применение,  
инновации, решения, системы

19—21 ноября 2013 г.

Выставочный центр «АККО Интернешнл»  
Украина, Киев, пр-т Победы, 40

Специализированная выставка отечественных и мировых производителей, поставщиков средств автоматизации и электронных компонентов, технологического оборудования и материалов для электронной и электротехнической промышленности.

Сегодня ее органично дополняет седьмой международный специализированный форум-выставка SMART CITY-2013.

Будет представлена обширная экспозиция отечественных и мировых производителей, поставщиков средств автоматизации и электронных компонентов, технологического оборудования и материалов для производства электронной и электротехнической промышленности.

Ключевым мероприятием деловой программы выставки станет конференция под эгидой Ассоциации предприятий промышленной автоматизации Украины на тему «Промышленная автоматизация: от продуктов — к решениям»



Контакты  
ООО «Смарт Экспо»  
Украина, Киев, 02095, а/я 24  
тел.факс: +38 (044)576-46-06  
тел.факс: +38 (044)566-48-61  
моб.: +38 (050)462-21-52  
моб.: +38 (050)313-45-19  
info @ smart-expo.com.ua  
<http://aiss-automatica.com.ua>

*Номер готовили  
Арзамас, Алчевск, Днепропетровск,  
Донецк, Киев, Львов, Минск, Москва,  
Одесса, Пенза, Харьков*



Пишите  
Подписывайтесь  
Читайте