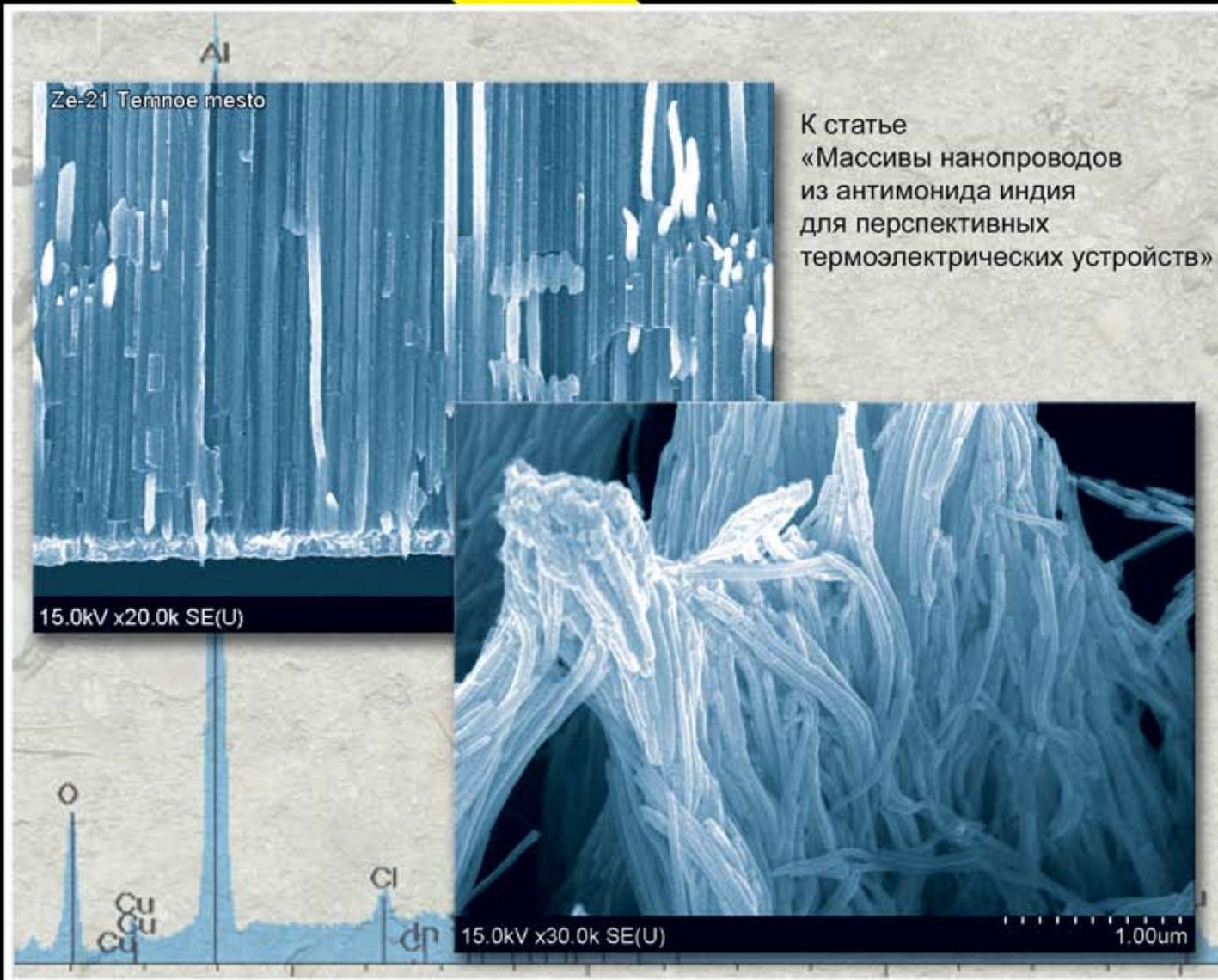




# ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



# 1 2015

ЯНВАРЬ — ФЕВРАЛЬ

ШЕСТНАДЦАТАЯ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



## СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

25 – 29 мая 2015 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 Ulrich's Periodicals Directory, CrossRef, DOAJ и наукометрическую базу РИНЦ



### 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.
- В России** Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
- В Белоруссии** Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 23785.
- 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. Корецкая.

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

Подписано к печати 24.02.2015. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.  
Печ. л. 8,0+1,0. Уч.-изд. л. 10,0. Тираж 200 экз. Заказ № 33.  
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

2015

№ 1

Год издания 39-й

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

*К.т.н. В. М. Чмиль*

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

*Чл.-корр. НАНУ,*

*д.ф.-м.н. А. Е. Беляев (г. Киев)*

*Д.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)*

*Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)*

*К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)*

*Д.т.н. 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. главного редактора (г. Киев)*

*Д.ф.-м.н. В. В. Должиков (г. Харьков)*

*К.т.н. И. Н. Еримичой,*

*зам. главного 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. И. Круковский (г. Львов)*

*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)*

*К.т.н. В. Е. Трофимов (г. Одесса)*

**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 № 4 от 23.12 2014 г.)

Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

**Новые компоненты для электронной аппаратуры**

Массивы нанопроводов из антимонида индия для перспективных термоэлектрических устройств. *Г. Г. Горох, И. А. Обухов, А. А. Лозовенко*

3

**Системы передачи и обработки сигналов**

Физиологические аспекты проектирования систем скрытой передачи информации на оптическом излучении видимого диапазона. *В. В. Браиловский, М. Г. Рождественская, И. В. Пислар, О. В. Пошак*

13

**Сенсоэлектроника**

Моделирование отклика CdZnTe- и TlVg-детекторов для регистрации смешанного бета- и гамма-излучения. *А. И. Скрыпник*

17

**Энергетическая электроника**

Анализ энергетических процессов в импульсных преобразователях электрической энергии переменного тока. *А. Ф. Кадацкий, А. П. Русу*

22

**Функциональная микро- и нанoeлектроника**

Исследование удельного сопротивления омических контактов Au-Ti-Pd-n-Si для лавинно-пролетных диодов. *В. В. Басанец, В. С. Слепокуров, В. В. Шинкаренко, Р. Я. Кудрик, Я. Я. Кудрик*

33

**Технологические процессы и оборудование**

Статистический анализ и оптимизация параметров технологии изготовления биполярного транзистора с изолированным затвором. *В. В. Баранов, А. М. Боровик, И. Ю. Ловшенко, В. Р. Стелтицкий, Чан Туан Чунг, Ибрагим Шелибак*

38

**Обеспечение тепловых режимов**

Влияние эффективности исходных материалов на показатели надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Часть I: Однокаскадные ТЭУ. *В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, А. А. Гнатовская, Ю. И. Журавлев*

44

**Материалы электроники**

Осаждение пленок борофосфоросиликатного стекла с использованием системы ТЭОС-диметилфосфит-триметилборат. *А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко* (на английском языке)

49

**Указатель статей, опубликованных в журнале в 2014 г.**

59

**Список рецензентов номера**

63

**Памятка автору журнала «ТКЭА»**

64

**Новые книги**

12

ЗМІСТ

CONTENTS

**Нові компоненти для електронної апаратури**

Масиви нанопроводів з антимоніда індія для перспективних термоелектричних пристроїв. *Г. Г. Горох, І. А. Обухов, А. А. Лозовенко* (3)

**Системи передачі та обробки сигналів**

Фізіологічні аспекти проектування систем прихованої передачі інформації на оптичному випромінюванні видимого діапазону. *В. В. Браїловський, М. Г. Рождественська, І. В. Пислар, О. В. Пошак* (13)

**Сенсоелектроніка**

Моделювання відгуку CdZnTe- та TlBr-детекторів для реєстрації змішаного бета- та гамма-випромінювання. *Г. І. Скрипник* (17)

**Енергетична електроніка**

Аналіз енергетичних процесів в імпульсних перетворювачах електричної енергії змінного струму. *А. Ф. Кадацький, О. П. Русу* (22)

**Функціональна мікро- та наноелектроніка**

Дослідження питомого опору омичних контактів Au–Ti–Pd–n-Si для лавинно-пролітних діодів. *В. В. Басанець, В. С. Слепокуров, В. В. Шинкаренко, Р. Я. Кудрик, Я. Я. Кудрик* (33)

**Технологічні процеси та обладнання**

Статистичний аналіз і оптимізація параметрів технології виготовлення біполярного транзистора з ізолюваним затвором. *В. В. Баранов, А. М. Боровик, І. Ю. Ловшенко, В. С. Стелтицький, Чан Туан Чунг, Ібрагім Шелібак* (38)

**Забезпечення теплових режимів**

Вплив ефективності первинних матеріалів на показники надійності термоелектричних охолоджувальних пристроїв. Частина I: Однокаскадні ТЕП. *В. П. Зайков, В. І. Мецєряков, Г. А. Гнатовська, Ю. І. Журавльов* (44)

**Матеріали електроніки**

Осадження плівок борофосфоросілікатного скла з використанням системи ТЕОС–діметилфосфіт–триметилборат. *А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко* (англійською) (49)

**New components for electronic equipment**

Indium antimonide nanowires arrays for promising thermoelectric converters. *G. G. Gorokh, I. A. Obukhov, A. A. Lozovenko* (3)

**Signals transfer and processing systems**

Physiologic aspects of designing hidden information systems based on visible optical radiation. *V. V. Brailovskii, M. G. Rozhdestvenskaya, I. V. Pislar, O. V. Poshak* (13)

**Sensors**

CdZnTe- and TlBr-detectors response simulation for registration of the mixed beta- and gamma-radiation. *A. I. Skrypnik* (17)

**Power electronics**

Analysis of energy processes in pulse converters of AC electric power. *A.F. Kadatsky, A.P. Rusu* (22)

**Functional micro- and nanoelectronics**

Investigation of contact resistivity for Au–Ti–Pd–n-Si ohmic contacts for impatt diodes. *V. V. Basanets, V. S. Slepokurov, V. V. Shinkarenko, R. Ya. Kudrik, Ya. Ya. Kudrik* (33)

**Production technology and equipment**

Statistical analysis and optimization of IGBT manufacturing flow. *V. V. Baranov, A. M. Borovik, I. Yu. Lovshenko, V. R. Stempitsky, Tran Tuan Trung, Ibrahim Shelibak* (38)

**Thermal management**

Influence of the effectiveness of raw materials on the reliability of thermoelectric cooling devices. Part I: Single-stage TEDs. *V. P. Zaikov, V. I. Meshcheryakov, A. A. Gnatovskaya, Yu. I. Zhuravlev* (44)

**Materials of electronics**

Deposition of borophosphosilicate glass films using the TEOS–dimethylphosphite–trimethylborate system. *A. S. Turtsevich, O. Y. Nalivaiko* (in English) (49)

К. т. н. Г. Г. ГОРОХ<sup>1</sup>, к. ф.-м. н. И. А. ОБУХОВ<sup>2</sup>, А. А. ЛОЗОВЕНКО<sup>1</sup>

Республика Беларусь, г. Минск, <sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; Россия, Московская обл., <sup>2</sup>НПП «Системные ресурсы»

E-mail: gorokh@bsuir.by, i\_obukhov@systemres.ru

## МАССИВЫ НАНОПРОВОДОВ ИЗ АНТИМОНИДА ИНДИЯ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

*Теоретически обоснована возможность создания перспективных термоэлектрических преобразователей на основе квантовых проводов. Разработаны и апробированы технологические методы изготовления массивов InSb-нанопроводов, имеющих высокое аспектное отношение диаметра к длине, в модифицированных матрицах нанопористого анодного оксида алюминия. Исследована микроструктура и состав сформированных наноструктур. Представлены результаты электрофизических исследований массивов InSb-нанопроводов в порах анодного оксида алюминия и рассмотрены перспективы их практического применения при изготовлении новых типов генерирующих и охлаждающих устройств.*

*Ключевые слова: массивы нанопроводов, квантово-размерные эффекты, анодный оксид алюминия, антимонид индия, термоэлектрический преобразователь.*

Современные нанотехнологии уже сегодня позволяют создавать нанобъекты, размеры которых соизмеримы или даже меньше длины размерного квантования  $L_{dq}$  [1]. В тех случаях когда поперечные размеры одномерных проводников меньше  $L_{dq}$ , происходят изменения в их потенциальных рельефах для электронов, возникают неравновесные квантовые эффекты на границах между квантовыми проводами с различными поперечными сечениями и проявляются другие квантовые эффекты [2]. В [3–5] теоретически показана возможность использования для термоэлектрических преобразований неравновесных явлений, возникающих на границах проводящего канала и контактов квантового провода (КП). При соответствующем выборе конструктивных параметров КП протекание тока через прибор будет приводить к охлаждению эмиттерного контакта и нагреванию коллекторного [3]. При наличии множества таких КП этот эффект многократно усилится и можно добиться охлаждения эмиттерного контакта на десятки градусов. Соответственно, при наличии разности температур между контактами КП будет возникать электрический ток.

В качестве материалов для создания КП наиболее предпочтительным является антимонид индия, имеющий малую ширину запрещенной зоны (0,18 эВ) и высокую подвижность электронов ( $7,8 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ) [6], благодаря чему приборы на основе InSb способны принимать инфракрасное излучение с длиной волны до  $\lambda \approx 7 \text{ мкм}$  и обладают наилучшими частотными свойствами [7]. Еще одна его важная особенность — наноструктуры из InSb имеют максимальную для полупроводников группы  $A^{III}B^V$

длину размерного квантования электронов, составляющую 58 нм при комнатной температуре. Поэтому снижение линейных размеров InSb-наноструктур менее 60–50 нм при температуре  $T=300 \text{ К}$  уже приводит к изменению характера квантовых состояний электронов и проявлению квантово-размерных эффектов [8, 9]. Уменьшение же размеров InSb-наноструктур до десятков и единиц нанометров позволяет изменять ширину их эффективной запрещенной зоны от 0,5 до 3,2 эВ — в максимально широком для полупроводников этой группы диапазоне [10].

Среди физико-химических методов получения InSb-наноструктур наиболее привлекательным является метод электрохимического осаждения на металлические основания и пленки (Au, Ag, Pt, Ni, Cu) в специально приготовленные «темплейты», в частности в нанопористые пленки анодного оксида алюминия (АОА) [11, 12]. Однако специфическая структура АОА не позволяет непосредственно использовать его в качестве шаблона для электрохимического осаждения InSb — для этого необходимо заменить диэлектрический барьерный оксидный слой у основания пор на проводящую пленку. Ранее нами были разработаны методы электрохимического осаждения металлов (Ni, Cu) и полупроводников (InSb) в модифицированные матрицы АОА толщиной 0,5–1 мкм на металлизированных кремниевых подложках [13, 14]. Разработка методов управляемого формирования нанопроводов антимонида индия заданной размерности открывает перспективы для использования широкого спектра квантовых явлений в качестве основы функционирования микроэлектронных приборов, в том числе осуществляющих эффектив-

ное преобразование тепловой энергии в электрическую и наоборот.

Целью настоящей работы было обоснование возможности создания термоэлектрических преобразователей на основе неравновесных эффектов в квантовых проводках, формирование массивов квантовых проводков с большим аспектным отношением их длины к диаметру с помощью нанопористых темплейтов из анодного оксида алюминия, а также исследование их структуры, состава и электрофизических характеристик, что необходимо для создания в перспективе на их основе новых типов генерирующих и охлаждающих устройств.

**Теоретические предпосылки для создания микроэлектронных устройств, основанных на квантовых неравновесных эффектах**

Для объяснения возникновения неравновесных эффектов в нанопроводах представим квантовый провод в виде проводящего канала — прямоугольного параллелепипеда, на концах которого находятся эмиттерный и коллекторный контакты КП (рис. 1). Порогом для квантовых эффектов в твердых телах является длина размерного квантования:  $L_{dq} = \pi \cdot (1,5\hbar\tau_0 / m^*)^{1/2}$  (где  $\tau_0 = \hbar / (kT)$  — время релаксации электронного газа к термодинамическому равновесию [5, 8],  $\hbar$  — постоянная Планка), поэтому в тех случаях, когда поперечные размеры проводящего канала меньше  $L_{dq}$ , при протекании тока через КП его эмиттерный контакт будет охлаждаться, а коллекторный — нагреваться.

В основе этих явлений лежит эффект Пельтье, проявляющийся на границах эмиттерного и коллекторного контактов КП. Если поперечные размеры проводящего канала достаточно малы, то в направлении переноса заряда он представляет собой потенциальный барьер для электронов. В результате размерного квантования между энергией Ферми электронов в контактах ( $E_F$ ) и первым разрешенным уровнем их энергии в проводящем канале квантового провода ( $E_1$ ) возникает энергетическая щель:  $\Delta = E_1 - E_F > 0$ . Величина  $\Delta$  представляет собой нижнюю границу энергии, которая может быть поглощена либо испущена электронами при переходе из состояния с энергией не выше энергии Ферми в состояние с энергией, разрешенной в проводящем канале.



Рис. 1. Иллюстрация к описанию квантового провода

На рис. 2 хорошо видно, что уровни разделены энергетическими щелями, превышающими энергию тепловых флуктуаций  $k_B T$  ( $k_B$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура) при комнатной температуре, равную примерно 0,026 эВ. Поскольку высота потенциального барьера, создаваемого проводящим каналом для электронов в КП, является функцией поперечных размеров этого канала, от этих размеров будут зависеть электрофизические свойства провода. Кроме того, инжекция электронов из контакта в канал по своему физическому смыслу эквивалентна испарительной эмиссии [3, 8].

Если порядок величин  $\Delta$  и  $k_B T$  одинаков, то, прикладывая к КП внешнее напряжение, можно добиться охлаждения эмиттерного контакта в результате переноса заряда и охлаждения коллекторного. Таким образом, этот эффект обусловлен «испарением» электронов в узкой области вблизи эмиттерного контакта и последующим их переносом через проводящий канал к другому контакту [3–5, 15]. На рис. 3, где показано распределение отношения  $n/n_{eq}$  вдоль квантового провода ( $n$  — концентрация электронов при напряжении  $V=0,38$  В,  $n_{eq}$  — равновесная концентрация электронов, вычисленная как концентрация при  $V=0$  В), видно, что в области про-

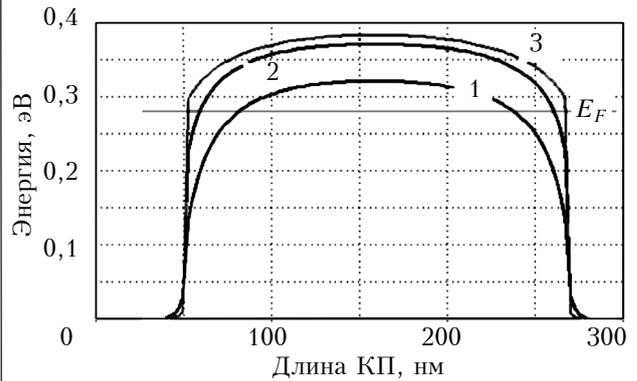


Рис. 2. Потенциальные рельефы для электронов в КП при нулевом напряжении для проводящих каналов различного диаметра:

1 —  $d=L_{dq}/2$ ; 2 —  $d=L_{dq}/3$ ; 3 —  $d=L_{dq}/4$

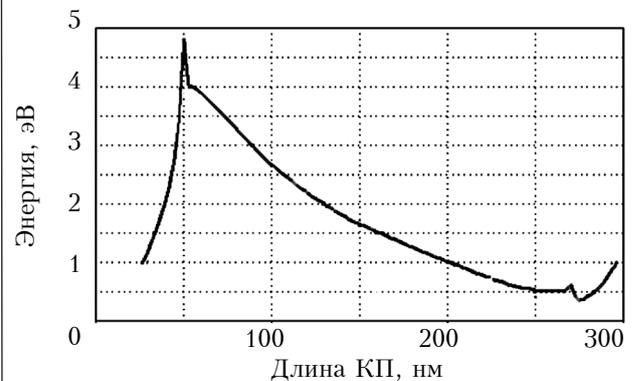


Рис. 3. Распределение электронов в КП диаметром  $d=L_{dq}/4$  при  $V=0,38$  В

водящего канала, примыкающей к эмиттерному контакту, концентрация «испарившихся» из эмиттера электронов в несколько раз превышает равновесную концентрацию. При этом в области коллекторного контакта наблюдается обеднение проводящего канала электронами.

В результате инжекции электронов из контактных областей в проводящем канале происходит поглощение и излучение электронами энергии тепловых флуктуаций. При поглощении электроны переходят из состояний с энергией меньшей высоты потенциального барьера в состояния с большей энергией. Таким же образом происходят и обратные переходы с излучением тепловой энергии. Если между эмиттерным и коллекторным каналами приложено ненулевое смещение, то в КП возникает электрический ток. Электроны, поглотившие тепловую энергию, увлекаются этим током из контакта с меньшим приложенным напряжением в проводящий канал. Здесь электроны не могут излучить тепловую энергию, поскольку в этой области отсутствуют состояния с энергией, меньшей высоты потенциального барьера. Излучение тепловой энергии и уменьшение энергии электронов происходит только в области противоположного контакта. Следует отметить, что описанные явления могут быть использованы для создания нанохолодильников или, что то же самое, «тепловых насосов» на основе массивов из квантовых проводов. Теоретические оценки показывают, что в таких устройствах возможно охлаждение объектов, примыкающих к эмиттерным контактам квантовых проводов, на десятки градусов [3, 5].

Кроме испарительной эмиссии в области перехода между эмиттерным контактом и проводящим каналом наблюдается поглощение фотонов инфракрасного диапазона, что позволяет использовать КП в качестве фотоячейки [16]. При соответствующей мощности внешнего электромагнитного излучения один КП может вырабатывать примерно 10 нВт электроэнергии. Рассчитанные значения максимальной мощности, отбираемой от одного КП, и коэффициента полезного действия такой ячейки пропорциональны отношению  $R_0/R$ , где  $R_0 = \hbar/e^2 \approx 4,1$  кОм,  $e$  — заряд электрона,  $R$  — сопротивление квантового провода. То есть очевидно, что эффективность преобразования тем выше, чем ниже сопротивление КП.

Комбинация «теплого насоса» и фотоячейки на основе квантовых проводов позволяет построить квантовый термоэлектрический преобразователь. Его возможная схема показана на рис. 4, а. Он состоит из матрицы квантовых проводов, примыкающей к охлаждаемой поверхности, и аналогичной матрицы, осуществляющей преобразование инфракрасного излучения в электрический ток, а также из аккумуляторного и управляющего устройств. Базовым элементом для нанохолодильника, фотоячейки

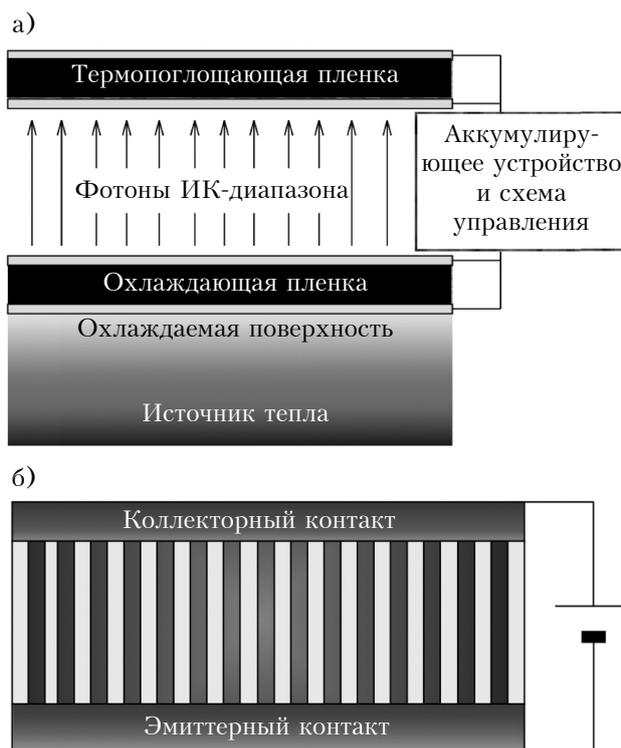


Рис. 4. Схематическое изображение квантового термоэлектрического преобразователя (а) и простейшего «охлаждающего» устройства на основе массивов нанопроводов (б)

и квантового термоэлектрического преобразователя может служить тонкопленочное функциональное устройство, схематически изображенное на рис. 4, б.

Роль квантовых проводов в этом устройстве выполняет массив нанопроводов, сформированных в пористой матрице анодного оксида алюминия, на противоположных сторонах которой находятся эмиттерный и коллекторный контакты. Температуру охлаждения в таком устройстве можно регулировать приложенным напряжением, при этом охлаждение будет тем больше, чем больше напряжение и концентрация электронов в эмиттерном контакте. Расчеты показывают, что при формировании КП из InSb и их поперечных размерах менее 58 нм может быть достигнуто значительное охлаждение эмиттерного контакта квантового провода — на десятки градусов.

#### Изготовление массивов InSb-нанопроводов в матрице АОА

Темплеты для осаждения в них InSb-нанопроводов получали путем двухстадийного электрохимического анодирования фольги из Al (99,99%), которую предварительно подвергали химической и механической обработке. Последовательность операций приготовления InSb-нанопроводов в матрицах АОА показана на рис. 5. Первую стадию анодирования подготовленных полированных заготовок проводили

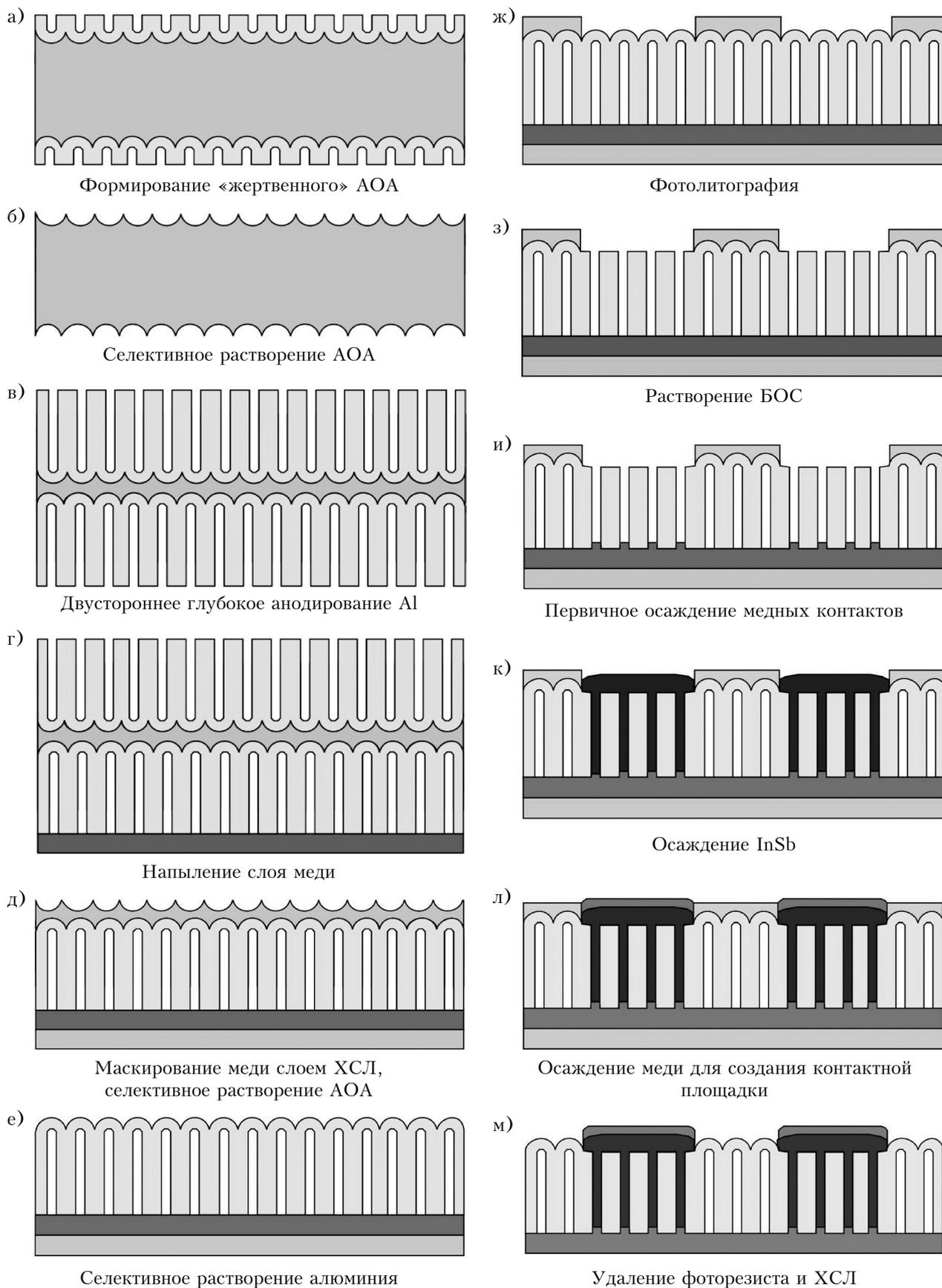


Рис. 5. Последовательность операций приготовления образцов с InSb-нанопроводами в матрицах АОА для измерения ВАХ

на глубину 5 мкм в 0,5 М водном электролите щавелевой кислоты при постоянном напряжении 35 В (рис. 5, а). Электрические параметры электрохимического процесса задавали с помощью стабилизированных источников питания и контролировали высокоточными вольтметрами. Их регистрацию и мониторинг осуществляли с помощью GPIB-контроллера, соединенного с персональным компьютером с установленным программным обеспечением HP Vee 6.01. Сформированный «жертвенный» слой АОА селективно удаляли (рис. 5, б) в растворе из смеси 20 г/л  $\text{CrO}_3$  и 35 мл/л  $\text{H}_3\text{PO}_4$  [17].

Повторное двухстороннее анодирование алюминиевой заготовки со структурированной отпечатками оксидных ячеек поверхности проводили в течение 270 мин в тех же электрохимических условиях, что и первое анодирование (рис. 5, в). За это время формировался слой АОА толщиной  $35 \pm 1$  мкм. Затем полученные образцы АОА обрабатывали в 2 М растворе серной кислоты при температуре  $50^\circ\text{C}$  в течение 3–5 мин, в результате чего поры очищались и увеличивались в диаметре до 35 нм. Далее на одну из сторон анодированной заготовки с пористым слоем АОА в вакууме напыляли слой меди толщиной 2 мкм (рис. 5, г). После этого поверхность меди закрывали слоем химически стойкого лака (ХСЛ) и высушивали сначала на воздухе в течение 40 мин, затем в термокамере при температуре  $90^\circ\text{C}$  в течение 10 мин. На следующем этапе проводили селективное растворение с обратной стороны заготовки: сначала — слоя пористого АОА в растворе на основе ортофосфорной кислоты и хромового ангидрида (рис. 5, д), затем — оставшегося после анодирования слоя алюминия в растворе из 1,25 г/л хлорида меди, 1 л соляной кислоты, 158 мл/л дистиллированной воды в течение 25 мин (рис. 5, е).

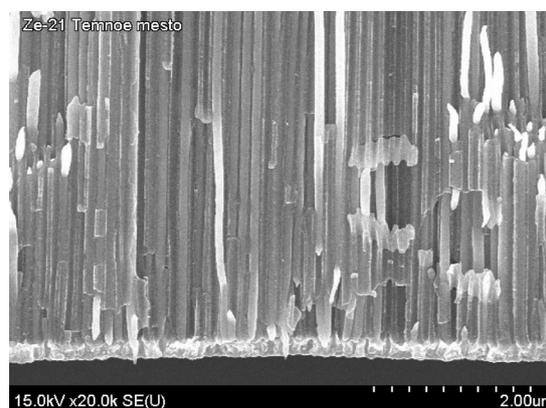
Для проведения электрофизических измерений необходимо было создать области с нанопроводами, локально осажденными на определенной площади. С помощью фотолитографии на стороне барьерного оксидного слоя (БОС) был сформирован рисунок со свободными от фоторезиста окнами размером  $1 \times 1$  мм (рис. 5, ж). Через маску фоторезиста в оставшихся свободными слоях АОА растворяли БОС в 5%-ном растворе ортофосфорной кислоты при  $50^\circ\text{C}$  в течение 10 мин (рис. 5, з). В поры приготовленных темплейтов сначала проводили электрохимическое осаждение тонкого слоя меди в 0,5 М растворе  $\text{CuSO}_4$  при плотности тока  $20 \text{ mA/cm}^2$  и температуре электролита  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  в течение 4,5 мин со скоростью около  $0,3 \text{ мкм/мин}$ . Таким образом были сформированы медные контакты толщиной около  $1,4 \text{ мкм}$  (рис. 5, и).

Электрохимическое осаждение антимонида индия на медные контакты в порах АОА осуществляли в водном растворе  $0,1 \text{ M SbCl}_3$ ,  $0,18 \text{ M InCl}_3$ ,  $0,35 \text{ M C}_6\text{H}_8\text{O}_7$  и  $0,17 \text{ M K}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ , доведенном 20%-ным раствором  $\text{HCl}$  до значения

$\text{pH}=2,0$  [11]. При электрохимическом осаждении использовали трехэлектродную электрохимическую ячейку с хлорсеребряным электродом сравнения. В качестве анода при осаждении использовали угольный электрод. Осаждение  $\text{InSb}$  проводили при постоянном токе плотностью  $20 \text{ mA/cm}^2$  в течение 25 мин при температуре электролита  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  и  $\text{pH}=2,0$ . Катодный потенциал относительно электрода сравнения ( $\text{Ag/AgCl}$ ) составлял 1,6 В. За указанное время  $\text{InSb}$  полностью заполнял поры АОА. После того как  $\text{InSb}$  начинал выходить из пор, уменьшалась плотность тока, а когда напряжение понижалось до 1,53 В, процесс останавливали (рис. 5, к). Для обеспечения хорошего омического контакта дополнительно проводили электролитическое осаждение меди на поверхность  $\text{InSb}$  при плотности тока  $10 \text{ mA/cm}^2$  в течение 20 мин (рис. 5, л). В завершение удаляли маску фоторезиста и слой ХСЛ с обратной стороны темплейта (рис. 5, м), а готовые образцы промывали в дистиллированной воде и высушивали в термостате.

Электронно-микроскопические изображения сечений нанопористых темплейтов из мембран АОА с осажденными нанонитями  $\text{InSb}$ , а также массив нанопроводов после селективного удаления матрицы, показаны на рис. 6. Как видно из снимков, в каждой поре по всей длине обра-

а)



б)

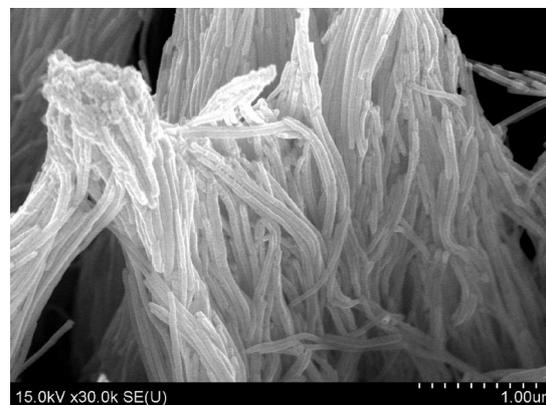


Рис. 6. Электронно-микроскопические снимки сечения АОА с нанопроводами  $\text{InSb}$  (а) и нанопроводов после растворения матриц АОА (б)

зовались нанопровода диаметром около 35 нм, что соответствовало размеру пор исходных темплайтов АОА. В соответствии с плотностью пор матрицы АОА, под каждым контактом находилось около  $2,568 \cdot 10^8$  нанопроводов, соединенных между собой подслоем меди.

На рис. 7 приведены результаты исследования состава InSb-нанопроводов в пористом темплайте из АОА, которые были получены методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа с помощью сканирующего электронного микроскопа, снабженного специальной приставкой AN 10000 фирмы Princeton Gamma-Tech, Inc. Такая приставка регистрировала характеристическое рентгеновское излучение от всех компонентов, которые попадали под действие первичного электронного луча микроскопа при его торможении на поверхности приготовленного образца, вызывая генерацию такого излучения. Характерный размер пятна от первичного луча составлял  $10 \times 10$  мкм, глубина проникновения луча — от 0,1 мкм до нескольких микрометров.

В полученном спектре присутствуют линии, соответствующие элементному составу исходной матрицы: линия с максимумом 1,62 эВ соответствует алюминию в структуре мембраны АОА; 8,16 эВ — подслою меди, на который осаждали InSb; 1,26 эВ — кислороду; 1,48 эВ — частично окисленной меди в порах. Состав нанопроводов в порах АОА характеризуется наличием в спектре нескольких линий, соответствующих индию в разных формах (2,87; 3,52; 3,72 и 3,9 эВ) с максимальной полосой 3,22 В, а также сурьме (3,2; 3,82; 4,15 и 4,6 эВ) с максимальной полосой 3,52 эВ. Кроме того, в образце обнаружен хлор (2,6 и 2,87 эВ), который, вероятно, вошел в структуру композита из электролита.

В результате машинной обработки полученных данных было рассчитано процентное со-

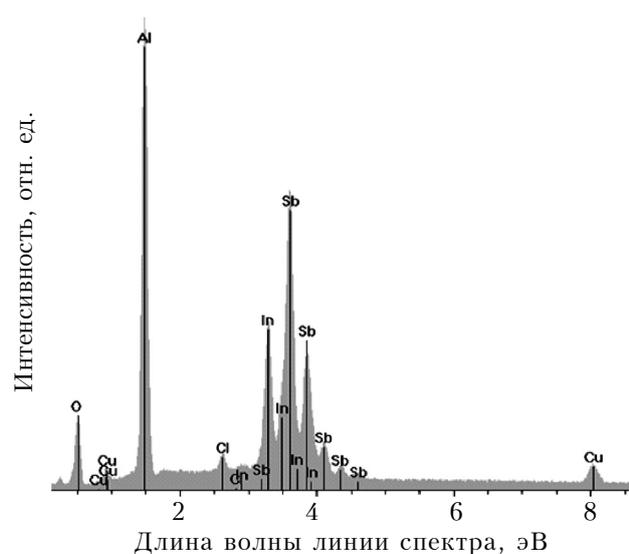


Рис. 7. Результаты электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа нанопроводов InSb в матрицах АОА

отношение индия и сурьмы в составе осажденных InSb-нанопроводов: массовое — 36,89% In и 63,11% Sb; атомное — 38,26% In и 61,74% Sb.

### Измерение ВАХ массивов InSb-нанопроводов

Исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) массивов нанопроводов InSb в матрице АОА проводили с помощью автоматизированной системы 4061 фирмы Hewlett-Packard, снабженной зондовым устройством с медными микроконтактами, источника токов и напряжений, имеющего цифровой (GPIB, IEEE 488) интерфейс, и мультиметра Agilent 34401A. Управление режимами измерений и регистрацию параметров проводили с помощью персонального компьютера, соединенного с приборами с помощью контроллера USB-GPIB Card фирмы Agilent Technologies, позволяющего записывать и обрабатывать показания с регистрирующих приборов в реальном времени. Образцы исследуемых матриц помещались нижней частью со сплошным медным слоем (см. рис. 5, м) на покрытую медью пластину. К их верхним площадкам, представляющим собой окна размером  $1 \times 1$  мм, прикреплялся рабочий контакт с помощью пружинящего медного зонда. В процессе измерений линейно увеличивали/понижали напряжение на рабочем контакте со скоростью 0,1 В/с и регистрировали на мониторе и мультиметре показания тока, протекающего между нижним и верхним контактами.

В результате исследований было обнаружено, что при первом включении в системе Cu — InSb — Cu ток увеличивался нелинейно, и при напряжении около 1 В наблюдались резкие скачки тока в виде осцилляций (рис. 8, а, кривая 1), при уменьшении напряжения ток линейно спадал до нуля (рис. 8, а, кривая 2). После смены полярности на контактах образца картина повторилась, только в отрицательных ординатах (рис. 8, а, кривые 3 и 4). Такое поведение тока, вероятно, связано с контактными явлениями на границе нанопроводов InSb и контактов из Cu. В анодированной матрице с электрохимически осажденными нанопроводами присутствует некоторое количество гидроксидов и некомпенсированного кислорода, которые могут взаимодействовать с медными контактами [18], в результате чего при анодном включении на контактах образуются тонкие плоские коррозионные зоны  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}$  и  $\text{CuO}/\text{Cu}$  [19]. Анодно-сформированные на Cu тонкие слои  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{CuO}$  обладают *p*-типом проводимости [20], поэтому на границе нанопроводов InSb, представляющих собой полупроводник *n*-типа, и медного контакта, покрытого акцепторным оксидом меди, образуется запирающий контакт, который начинает пробиваться при напряжении, близком к 1 В. После повторных включений при больших напряжениях осцилляции тока исчезли и ВАХ приобрели вид, показанный на рис. 8, б: ток практически линейно

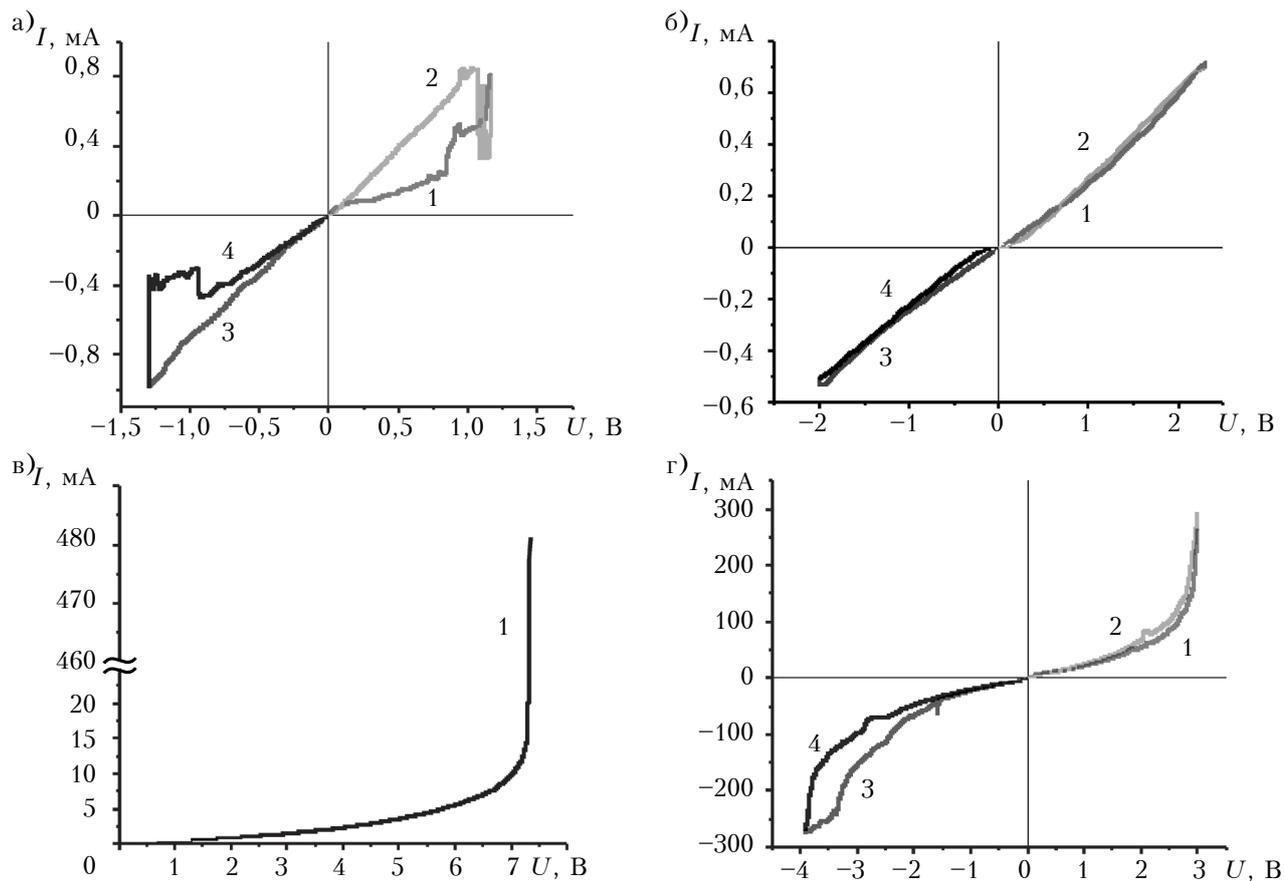


Рис. 8. ВАХ матриц нанопроводов InSb в матрицах АОА на различных этапах измерений

увеличивался и уменьшался, соответственно, с ростом и снижением напряжения на контактах в диапазоне  $\pm 2$  В. При этом значения тока увеличилось незначительно.

Дальнейшее увеличение напряжения привело к близкому к экспоненциальному росту тока, а при  $U \approx 7$  В произошел резкий его скачок (рис. 8, в). Здесь, вероятно, произошла «приработка» контактных переходов InSb/Cu, т. к. при последующих включениях ВАХ исследуемых структур были стабильны и носили экспоненциальный характер при прямом и обратном включениях (рис. 8, г). При этом характерное управляющее напряжение значительно снизилось, а значения тока были стабильны во времени и достигали 320 мА, что соответствовало плотности тока  $129,8 \text{ А/см}^2$  через сечения всех нанопроводов.

В процессе токовых измерений с помощью инфракрасного измерителя температуры DT-8380 регистрировали значения температуры верхнего (коллекторного) контакта при положительном включении массива нанопроводов и нижнего (эмиттерного) контакта при его отрицательном включении. При кратковременном положительном включении образца при напряжении 3 В через него протекал ток около 250 мА, и коллекторный контакт за 150 с разогрелся до  $73^\circ\text{C}$ , а при обратном включении температура эмиттерного контакта достигала  $55^\circ\text{C}$ . Предположительно,

это явление обусловлено двумя неравновесными эффектами: инжекцией электронов из эмиттерного контакта в проводящий канал и нарушением локального химического равновесия между фазами «эмиттерных» и «коллекторных» электронов. Оба обнаруженных эффекта являются следствием протекания тока через области с высоким градиентом концентрации электронов. Источники неравновесности локализованы в  $n^+-n$ -переходах между контактами и массивом нанопроводов. Значения указанного градиента определяются концентрацией электронов в материалах контактов. При этом необходимо отметить, что температурный эффект был бы намного выше в случае большего структурного совершенства нанопроводов, а также при создании контакта из другого материала, например из золота.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности изготовления массивов нанопроводов InSb с неплохими электрическими характеристиками. Они подтверждают сделанные ранее теоретические и экспериментальные выводы о сильном влиянии контактных явлений на эти характеристики [1–3, 8]. Для эффективного использования матриц нанопроводов в качестве термоэлектрических преобразователей необходимо отработать технологию устойчивого формирования контактов с максимальной туннельной прозрачностью и за счет это-

го повысить плотность тока в нанопроводах до 104–105 А/см<sup>2</sup>.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что в структурах с массивами квантовых проводов, поперечные размеры которых меньше величины размерного квантования, из материала с высокой концентрацией и подвижностью электронов при комнатной температуре может быть достигнуто значительное охлаждение одного из контактов на десятки градусов. Используемый в работе темплетный метод электрохимического осаждения антимида индия в нанопористые матрицы анодного оксида алюминия показал перспективность такого способа формирования квантовых проводов InSb с большим аспектным соотношением их диаметра и длины.

Проведенные электронно-микроскопические исследования, а также электронно-зондовый рентгеноспектральный микроанализ сформированных низкоразмерных систем показали, что нитевидные наноструктуры образуются в каждой поре на медном подслое, их диаметры соответствуют размерам пор, а длина определяется длительностью осаждения. Установлено, что бинарное полупроводниковое соединение InSb присутствует в разных формах, а атомарное содержание индия и сурьмы в составе наноструктур составляет 38,26 и 61,74% соответственно.

Проведенные вольт-амперные исследования изготовленных структур с нанопроводами InSb диаметром 35 нм в матрице АОА толщиной 35 мкм показали, что через них может протекать ток до 129,8 А/см<sup>2</sup> при напряжении 3 В. При этом коллекторный контакт при кратковременных включениях разогревается до 60–70°С. Таким образом, экспериментальные результаты подтвердили теоретические выводы о сильном влиянии контактных явлений на электрические характеристики массивов квантовых проводов, которые могут быть использованы при создании термоэлектрических устройств. Охлаждающие устройства на основе подобных систем квантовых проводов позволяют управлять тепловым режимом электрических схем приложенным напряжением и могут найти широкое применение в технике, в частности, для охлаждения интегральных схем (процессоров).

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Landis S. Nano-lithography. — London: ISTE, Hoboken NJ: Wiley. — 2011. — 345 p.
2. Демиковский В. Я., Вугальтер Г. А. Физика квантовых низкоразмерных структур. — Москва: Логос, 2000.
3. Обухов И. А. Самоохлаждение эмиттерного контакта квантового провода // Нано- и микросистемная техника. — 2007. — № 5. — С. 21–23.
4. Обухов И. А. Влияние внешнего электромагнитного излучения на ВАХ квантового провода // 20-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010). Т. 2. — Украина, г. Севастополь. — 2010. — С. 833–835.

5. Obukhov I. A. Nonequilibrium effects in one-dimensional quantum devices. — Lambert Academic Publishing, 2014.
6. Khan M. I., Penchev M., Jing X. et al. Electrochemical growth of InSb nanowires and report of a single nanowire field effect transistor // Journal of nanoelectronics and optoelectronics. — 2008. — Vol. 3, N 2. — P. 199–202. — DOI: 10.1166/jno.2008.203
7. Chen H., Sun X., Lai K. W. C. et al. Infrared detection using an InSb nanowire // Proceed. of IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC'09). — USA, Traverse City. — 2009. — P. 212–216.
8. Обухов И. А. Неравновесные эффекты в электронных приборах. — Севастополь: Вебер, 2010.
9. Yang X., Wang G., Slattery P. et al. Ultrasmall single-crystal indium antimonide nanowires // Crystal Growth and Design. — 2010. — Vol. 10, iss.10. — P. 2479–2482. — DOI: 10.1021/cg100376u
10. Васильев Р. Б., Дирин Д. Н. Квантовые точки: синтез, свойства, применение. — Москва: ФНМ, 2007.
11. Khan M. I., Wang X., Bozhilov K. N., Ozkan C. S. Templated fabrication of InSb nanowires for nanoelectronics // Journal of Nanomaterials. — 2008. — Vol. 2008. — P. 1–5. — DOI: 10.1155/2008/698759
12. Горох Г. Г., Обухов И. А., Лозовенко А. А. и др. Темплетный метод формирования квантовых нанопроводов InSb с большим аспектным отношением // 23-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013). — Украина, Севастополь. — 2013. — С. 820–823.
13. Горох Г. Г., Обухов И. А., Позняк А. А. и др. Синтез нанопроводов InSb в модифицированных матрицах анодного оксида алюминия // 22-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012). Т.2. — Украина, Севастополь. — 2012. — С. 655–658.
14. Горох Г. Г., Обухов И. А., Лозовенко А. А. и др. Формирование нанонитей InSb в пористых матрицах анодного оксида алюминия // Труды VII Междунар. науч. конф. «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах». — Белоруссия, Минск. — 2013. — С. 377–387.
15. Обухов И. А. Моделирование переноса заряда в мезоскопических структурах. — Севастополь: «Вебер», 2005.
16. Обухов И. А., Горох Г. Г. Электронные приборы на основе антимида индия // 22-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012). Т.2. — Украина, Севастополь. — 2012. — С. 653–654.
17. Wood G. C. Oxides and oxide films. — USA, New York: Marcell Dekker, 1987.
18. Ганжа С. В., Кухарева Н. В., Грушевская С. Н., Введенский А. В. Кинетика формирования оксидов Cu(I) и Cu(II) на меди в щелочном растворе и особенности их фотоэлектрохимического поведения. Часть II. Фотопотенциал // Конденсированные среды и межфазные границы. — 2010. — Том 12, № 1. — С. 42–52.
19. Ганжа С. В., Максимова С. Н., Грушевская С. Н. Формирование оксидов на меди в щелочном растворе и их фотоэлектрохимические свойства // Физикохимия поверхности и защита материалов. — 2011. — Том 47, № 2. — С. 146–175.
20. Грушевская С. Н., Елисеев Д. С., Ганжа С. В., Введенский А. В. Свойства полупроводниковых оксидов меди, сформированных на сплавах Cu–Au // Конденсированные среды и межфазные границы. — 2013. — Том 15, № 3. — С. 253–265.
21. Обухов И. А. Особенности функционирования квантовых приборов // Нано- и микросистемная техника. — 2009. — № 7. — С. 38–45.

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 14.11 2014 г.*

Г. Г. ГОРОХ<sup>1</sup>, І. А. ОБУХОВ<sup>2</sup>, А. А. ЛОЗОВЕНКО<sup>1</sup>

Республика Беларусь, м. Минск, <sup>1</sup>Белорусский державний університет інформатики і радіоелектроніки; Росія, Московська обл., <sup>2</sup>НПП «Системні ресурси»  
E-mail: gorokh@bsuir.by, i\_obukhov@systemres.ru

## МАСИВИ НАНОПРОВОДІВ З АНТИМОНІДА ІНДІЯ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИСТРОЇВ

*Теоретично обґрунтовано можливість створення перспективних термоелектричних перетворювачів на основі квантових проводів. Розроблено та апробовано технологічні методи виготовлення масивів InSb-нанопроводів, що мають високе аспектне відношення діаметра до довжини, в модифікованих матрицях нанопористого анодного оксиду алюмінію. Досліджено мікроструктуру та склад сформованих наноструктур. Представлено результати електрофізичних досліджень масивів InSb-нанопроводів в порах анодного оксиду алюмінію та розглянуто перспективи їх практичного застосування при виготовленні нових типів генеруючих і охолоджувальних пристроїв.*

*Ключові слова: масиви нанопроводів, квантово-розмірні ефекти, анодний оксид алюмінію, антимонід індію, термоелектричний перетворювач.*

DOI: 10.15222/ТКЕА2015.1.03  
UDC 621.396.6.029.64+621.36

G. G. GOROKH<sup>1</sup>, I. A. OBUKHOV<sup>2</sup>, A. A. LOZOVENKO<sup>1</sup>

Republic of Belarus, Minsk, <sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; Russia, Moscow region, <sup>2</sup>System Resources Ltd  
E-mail: gorokh@bsuir.by, i\_obukhov@systemres.ru

## INDIUM ANTIMONIDE NANOWIRES ARRAYS FOR PROMISING THERMOELECTRIC CONVERTERS

*The authors have theoretically substantiated the possibility to create promising thermoelectric converters based on quantum wires. The calculations have shown that the use of quantum wires with lateral dimensions smaller than quantum confinement values and high concentration and mobility of electrons, can lead to a substantial cooling of one of the contacts up to tens of degrees and to the heating of the other. The technological methods of manufacturing of indium antimonide nanowires arrays with high aspect ratio of the nanowire diameters to their length in the modified nanoporous anodic alumina matrixes were developed and tested. The microstructure and composition of the formed nanostructures were investigated. The electron microscopy allowed establishing that within each pore nanowires are formed with diameters of 35 nm and a length of 35 microns (equal to the matrix thickness). The electron probe x-ray microanalysis has shown that the atomic ratio of indium and antimony in the semiconductor nanostructures amounted to 38,26% and 61,74%, respectively. The current-voltage measurement between the upper and lower contacts of Cu/InSb/Cu structure (1 mm<sup>2</sup>) has shown that at 2.82 V negative voltage at the emitter contact, current density is 129,8 A/cm<sup>2</sup>, and the collector contact is heated up to 75 degrees during 150 sec. Thus, the experimental results confirmed the theoretical findings that the quantum wire systems can be used to create thermoelectric devices, which can be widely applied in electronics, in particular, for cooling integrated circuits (processors), thermal controlling of the electrical circuits by changing voltage value.*

*Keywords: nanowire array, quantum size effects, anodic alumina, indium antimonide, thermoelectric converter.*

### REFERENCES

1. Landis S. *Nano-lithography*, London UK: ISTE, Hoboken NJ: Wiley, 2011, 345 p.
2. Demikhovskii V. Ya., Vugal'ter G. A. *Fizika kvantovoykh nizkorazmernykh struktur* [Physics of the quantum low-dimensional structures]. Moscow, Logos, 2000, 248 p. (in Russian)
3. Obukhov I. A. Selfcooling of the quantum wire's emitter contact. *Journal of nano and Microsystem Technique*, 2007, vol. 5, pp. 21-23. (in Russian)
4. Obukhov I. A. Influence of external electromagnetic radiation on current voltage characteristics of quantum wire. *20<sup>th</sup> Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"*, Ukraine, Sevastopol, 2010, pp. 833-835. (in Russian)
5. Obukhov I. A. *Nonequilibrium effects in one-dimensional quantum devices*, Lambert Academic Publishing, 2014, 132 p.
6. Khan M. I., Penchev M., Jing X., Wang X., Ozkan M., C Ozkan. S., Bozhilov K. N. Electrochemical growth of InSb nanowires and report of a single nanowire field effect transistor. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2008, vol. 3, no 2, pp. 199-202. DOI: 10.1166/jno.2008.203
7. Chen H., Sun X., Lai K. W. C., Meyyappan M., Xi N. Infrared detection using an InSb nanowire. *Proceed. of IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC'09)*, USA, Traverse City, 2009, pp. 212-216.
8. Obukhov I. A. *Neravnovesnye efekty v elektronnykh priborakh* [Non-equilibrium effects in electronic devices]. Sevastopol', Veber, 2010, 303 p. (in Russian)
9. Yang X., Wang G., Slattery P., Zhang J. Z., Li Y. Ultrasmall single-crystal indium antimonide nanowires. *Crystal Growth and Design*, 2010, vol. 10, iss. 10, pp. 2479-2482. — DOI: 10.1021/cg100376u

10. Vasil'ev R. B., Dirin D. N. *Kvantovye tochki: sintez, svoystva, primeneniye* [Quantum dots: synthesis, properties and applications]. Moscow, FNM, 2007, 34 p. (in Russian)
11. Khan M. I., Wang X., Bozhilov K. N., Ozkan C. S. Templated fabrication of InSb nanowires for nanoelectronics. *Journal of Nanomaterials*, 2008, vol. 2008, pp. 1-5. — DOI: 10.1155/2008/698759
12. Gorokh G. G., Obukhov I. A., Lozovenko A. A., Zakhlebaeva A. I., Sochneva E. A. Template method of forming InSb large aspect ratio quantum nanowires. *23<sup>rd</sup> Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"*, Ukraine, Sevastopol, 2013, pp. 820-823. (in Russian)
13. Gorokh G. G., Obukhov I. A., Poznyak A. A., Lozovenko A. A., Zakhlebaeva A. I., Sochneva E. A. Synthesis of InSb nanowires in anodic alumina modified matrixes // *22<sup>nd</sup> Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"*, Ukraine, Sevastopol, 2012, pp. 655-658. (in Russian)
14. Gorokh G., Obukhov I., Lozovenko A., Zakhlebaeva A., Sochneva E. [Formation of InSb nanowires in porous anodic alumina]. *Proceed. VII International Conference "Fullerenes and nanostructures in condensed matter"*, 2013, pp. 377-387. (in Russian)
15. Обухов И. А. *Modelirovaniye perenosa zaryada v mezoskopicheskikh strukturakh* [Simulation of charge transport in mesoscopic structures]. Sevastopol, Veber, 2005, 226 p. (in Russian)
16. Obukhov I. A., Gorokh G. G. [InSb-based electron devices]. *22<sup>nd</sup> Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"*, Ukraine, Sevastopol, 2012, pp. 653-654. (in Russian)
17. Wood G. C. *Oxides and oxide films*. USA, New York, Marcell Dekker, 1987, 537 p.
18. Ganzha S.V., Kukhareva N.V., Grushevskaya S.N., Vvedenskii A.V. [The kinetics of the formation of Cu(I) and Cu(II) oxides on copper in alkaline solutions and the features of their photoelectrochemical behavior. Part II. Photopotential]. *Condensed matter and interphase boundaries*, 2010, pp. 42-52. (in Russian)
19. Ganzha S.V., Maksimova S.N., Grushevskaya S.N., Vvedenskii A.V. Formation of oxides on copper in alkaline solution and their photoelectrochemical properties. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2011, vol. 47, no 2, pp. 191-202.
20. Grushevskaya S.N., Eliseev D. S., Ganzha S.V., Vvedenskii A.V. [The Properties of Semiconducting Copper Oxides Formed on Cu-Au Alloys]. *Condensed matter and interphase boundaries*, 2013, vol/ 15, no 3, pp. 253-265. (in Russian)
21. Obuhov I. A. [Features of functioning of quantum devices]. *Journal of nano and Microsystem Technique*, 2009, no 7, pp. 38-45. (in Russian)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П. Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук  $A_3B_5$ .— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.**

Проаналізовано фізичні основи створення напівпровідникових тензорезистивних датчиків механічних величин. Наведено характеристики тензорезисторів на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук  $A_3B_5$  та результати досліджень впливу електронного опромінення на властивості ниткоподібних кристалів кремнію. Розглянуто технологічні основи виготовлення датчиків механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію для різних температурних діапазонів, а також їх конструктивні особливості. Описано датчики тиску різного призначення та їхні характеристики, а також датчики зусилля і прискорення. Розглянуто можливості створення багатofункційних датчиків для вимірювання механічних і теплових величин.

Для наукових, інженерно-технічних працівників і студентів, які навчаються за напрямом "Мікро- та нанoeлектроніка", а також широкого загалу спеціалістів у галузі сенсорної електроніки та мікроелектроніки.



НОВЫЕ КНИГИ

**Баришніков Г. В., Волинюк Д. Ю., Гельжинський І. І., Готра З. Ю., Мінаєв Б. П., Стахіра П. Й., Черпак В. В. Органічна електроніка.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.**

Наведено основні постулати квантової механіки для органічної електроніки. Описано базові структури та особливості функціонування нанорозмірних елементів, пристроїв електронної техніки: сонячних фотоелементів, світловипромінювальних структур, транзисторних структур, сенсорів тощо. Розглянуто фізико-хімічні основи технології створення електронних структур органічної електроніки.

Призначено для студентів та аспірантів, які навчаються за напрямом електроніки.



К. ф.-м. н. В. В. БРАЙЛОВСКИЙ, к. ф.-м. н. М. Г. РОЖДЕСТВЕНСКАЯ,  
И. В. ПИСЛАР, О. В. ПОШАК

Украина, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича  
E-mail: brailovsky@ukr.net

## ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ СКРЫТОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ НА ОПТИЧЕСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА

*Описаны методика и результаты экспериментального исследования чувствительности зрения человека в центральном и периферическом полях к световым импульсам видимого диапазона. Установлены параметры световых импульсов, при которых возможна скрытая передача информации с помощью световых лучей видимого диапазона.*

*Ключевые слова: светодиод, световой импульс, фоновое освещение, чувствительность центрального зрения, чувствительность периферического зрения.*

Разработка и выпуск современных светодиодов, лазеров, характеризующихся высоким быстродействием и большой излучаемой мощностью, стимулируют формирование нового взгляда на системы передачи информации с использованием оптического излучения видимого диапазона [1]. Такие системы имеют определенные преимущества:

- передача данных с помощью света не сопровождается радиоизлучением;
- их развертывание проще по сравнению, например, с кабельными линиями;
- видимый диапазон света обеспечивает удобство настройки оборудования в отличие от существующих инфракрасных систем.

Коммерческие версии систем передачи данных на световых лучах видимого диапазона, известных как Li-Fi-системы, по аналогии с Wi-Fi, уже предлагаются на рынке. Например, британская компания «PureLiFi» (Эдинбург) выпустила продукт Li-1st, который представляет собой LED-систему беспроводного обмена данными с помощью модулированного светового луча [2].

Преимущества Li-Fi-систем будут еще более весомыми, если обеспечить скрытый режим их работы, при котором возможности человеческого зрения не позволят наблюдателю установить факт передачи информации. Это сделает реальным проектирование специализированных охранных систем, систем передачи информации с новыми элементами защиты, а также может найти свое применение в интеллектуальных осветительных комплексах [3, 4].

Из физиологии известно [5, 6], что критическая частота мельканий (минимальная частота проблесков, при которой возникает их слитное восприятие) зависит от яркости, размеров и конфигурации наблюдаемых объектов, спектрального состава мелькающего изображения и при обычных условиях наблюдения находится в ин-

тервале 15–25 Гц. Для целей кино и телевидения частота смены информации должна превышать эти значения и составлять не менее 40 Гц. В [4] автор указывает, что и при частоте импульсов света свыше 50 Гц наблюдатели все еще замечали мерцание светодиодного источника.

Очевидно, что влияние указанных факторов на способность человека различать световые импульсы центральным и периферическим зрением должно учитываться при проектировании оптических информационных систем.

Цель данной работы состоит в определении параметров световых сигналов (оптических импульсов видимого диапазона), при которых возможна незаметная для человека передача информации. Для этого проведены исследования восприятия человеком различных по частоте и длительности световых импульсов при различных уровнях фонового освещения.

### Описание эксперимента

В процессе проведения исследований диапазон изменения фонового освещения задавался в пределах от 50 до 600 лк, что соответствует диапазону значений уровня освещенности при тех или иных видах жизнедеятельности человека. В каждом конкретном случае уровень освещенности определялся согласно стандарту ISO 8995 [7]. Уровень фонового освещения измерялся сертифицированным люксметром ТЕС0693. Источником прямоугольных импульсов служил генератор, реализованный с помощью микроконтроллера PIC18F2550. Соответствие формы светового импульса форме прямоугольного электрического импульса, питающего светодиод, являлось критерием выбора диапазона изменения длительности импульсов. Необходимые параметры электрических импульсов вводились с помощью клавиатуры и отображались на дисплее. Сигнал генератора подавался на усили-

тель (транзистор  $VT1$  на рис. 1) с коэффициентом усиления по напряжению 5 и на эмиттерный повторитель ( $VT2$ ). К выходу эмиттерного повторителя подключался светодиод  $HL1$  марки CREE XM-L2, на котором обеспечивалась мощность электрического импульса порядка 10 Вт.

При проведении исследований центрального поля зрения источником фонового освещения служила лампа дневного света PHILIPS TL-D 36W/54-765. Уровень фонового освещения регулировался путем изменения расстояния между экраном, где размещался источник световых импульсов, и источником фонового света, а также использованием нейтральных фильтров.

При исследовании чувствительности периферического зрения к световым импульсам использовался проекционный периметр стандарта ISO 12866:2008 (Ophthalmic instruments — Perimeters) с механической системой фиксации угла поворота дуги периметра с шагом  $15^\circ$ . В общем случае, проекционный периметр — устройство, предназначенное для определения световой и цветовой чувствительности сетчатки глаза в условиях световой и цветовой адаптации для дневного, сумеречного и ночного зрения. Взгляд испытуемого должен быть направлен в центр дуги периметра, куда вмонтирована видеокамера. С ее помощью контролируется направление взгляда, и если оно выходит за пределы фиксированной области, результаты измерений считаются недействительными.

В эксперименте исследовалась чувствительность периферического зрения к стимулам (тест-объектам) с непрерывным и импульсным световым потоком отдельно правого и левого глаз человека. Необходимый уровень фонового освещения дуги периметра задавался лампой MAXUS 1-ESL-230-12 с равномерным свечением светоизлучающей поверхности. Изменение уровня фоновой освещенности обеспечивалось с помощью нейтральных светофильтров.

Поскольку восприятие световых импульсов разными людьми носит достаточно выраженный субъективный характер [4], для повышения достоверности полученных результатов при одних и тех же параметрах световых импульсов и фонового освещения исследования проводились не

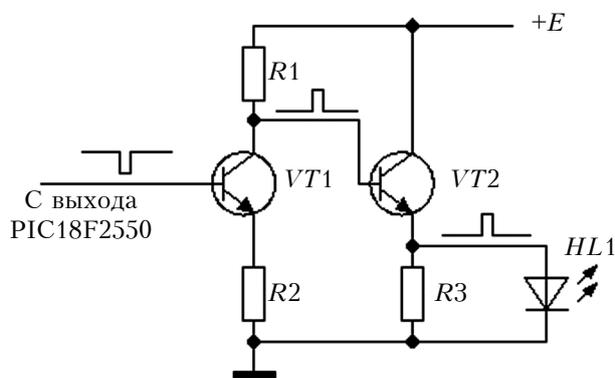


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема усилителя мощности генератора импульсов

менее чем с тремя испытуемыми, а полученные данные усреднялись.

### Результаты исследования

При исследованиях чувствительности центрального зрения человека было экспериментально установлено, что чем выше уровень фонового освещения  $E$ , тем шире диапазон частот  $F$  следования световых импульсов заданной длительности, при которых обеспечивается скрытность («невидимость») работы Li-Fi-системы (рис. 2). При этом была обнаружена скрытность двух типов:

- импульсы света неразличимы при заданном уровне фонового освещения — они сливались с фоном и не воспринимались как световые импульсы (область 2 на рис. 2);

- сформированные светодиодами импульсные последовательности воспринимались как непрерывный яркий свет, превышающий уровень фоновой освещенности (область 3 на рис. 2).

Область 1 на рис. 2 соответствует условиям, когда наблюдатель однозначно видит импульсы света (сюда относится и нулевой уровень освещения).

Таким образом, заштрихованная область на рис. 2 отражает люкс-частотные параметры невидимых для центрального зрения световых импульсов.

И минимальная частота следования световых импульсов ( $F_n$ ), при которой начинает проявляться эффект «невидимости», и максимальная ( $F_v$ ), при которой этот эффект еще присутствует, существенно зависят от длительности импульсов  $\tau$ . Как видно из рис. 3, рост  $\tau$  сопровождается уменьшением  $F_v$  и ростом  $F_n$ , т. е. сужением частотного интервала «невидимости» световых импульсов  $\Delta F = F_v - F_n$ .

Основные закономерности, полученные при исследовании периферического поля зрения, можно нагляднее отобразить не в общепринятой в офтальмологии полярной системе координат, а в декартовой. При переходе от одной системы координат к другой были использованы принятые в радиолокации термины: угол места ( $\varphi$ ),

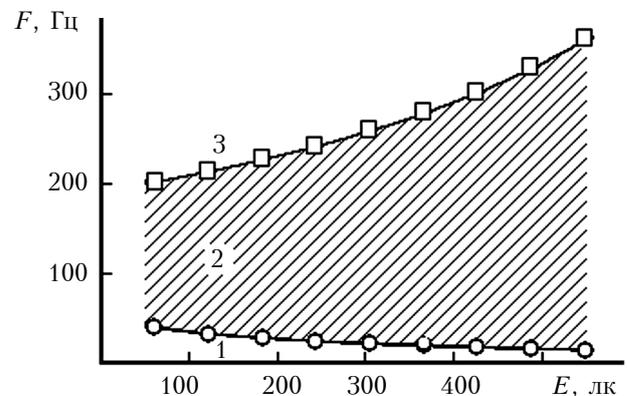


Рис. 2. Границы областей чувствительности центрального зрения человека к световым импульсам длительностью 5 мкс

под которым понимался угол положения стимула на дуге проекционного периметра, и азимутальный угол ( $\alpha$ ) — угол наклона самой дуги проекционного периметра относительно горизонта. Азимутальный угол был фиксированным, наиболее характерные его значения составляли 0, 60, 180 и 330°. Вдоль оси абсцисс декартовой системы откладывались значения того или иного параметра светового импульса стимула, а вдоль оси ординат — значения угла места  $\varphi$ , при котором испытуемый начинал воспринимать световой импульс стимула.

Результаты экспериментального исследования показали, что границы периферического поля зрения левого и правого глаз несколько различны, но общие закономерности для обоих глаз одинаковы. Для человека с нормальным зрением среднестатистическая область чувствительности периферического зрения к световым стимулам импульсного света отличается от чувствительности к стимулам непрерывного света. В случае импульсного излучения периферическое поле зрения человека существенно уже, чем при непрерывном. Необходимо отметить, что при низком уровне фонового освещения (не более 10–15 лк), а тем более при отсутствии освещения дуги периметра, периферическое поле зрения испытуемого было практически одинаковым при непрерывном и импульсном свете стимула.

Для периферического зрения, так же как и для центрального, существуют свои границы  $F_v$  и  $F_n$  «невидимости» световых импульсов. Для

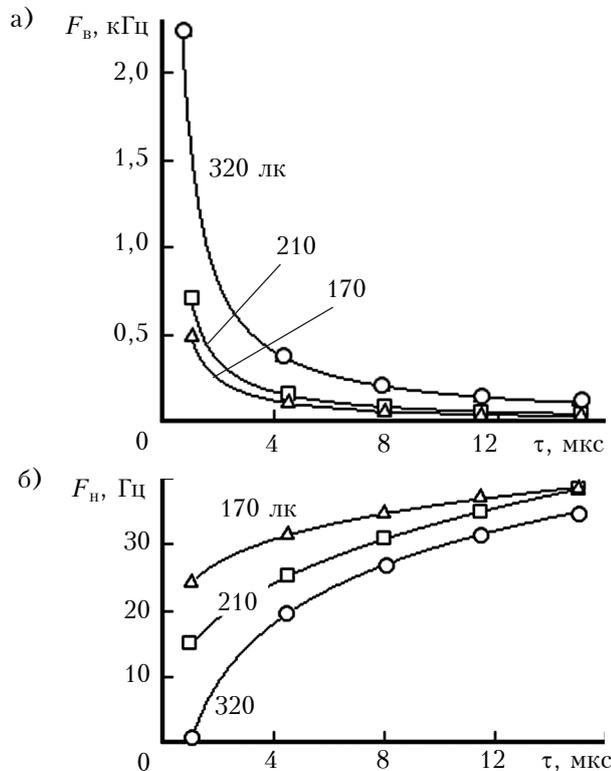


Рис. 3. Зависимость верхней (а) и нижней (б) частот области «невидимости» световых импульсов от их длительности при разных уровнях освещенности

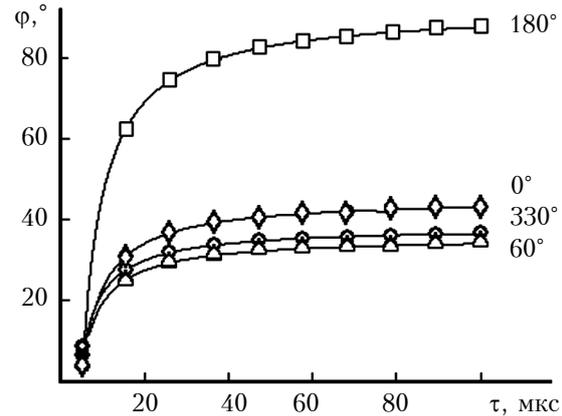


Рис. 4. Зависимость угла места от длительности импульсов при их частоте 10 Гц и фоновом освещении 50 лк для различных значений азимутального угла  $\alpha$

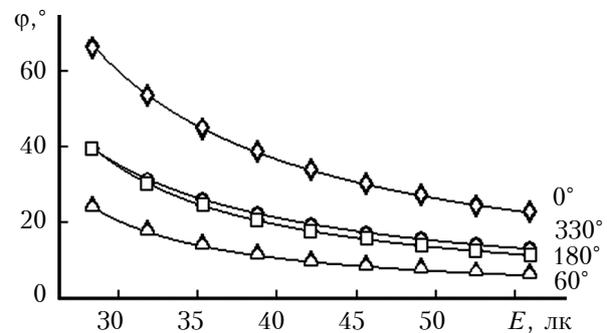


Рис. 5. Зависимость угла места от уровня фонового освещения при длительности импульсов 10 мкс и частоте 10 Гц для различных значений азимутального угла  $\alpha$

исследований периферического поля зрения параметры световых импульсов стимула выбирались из «видимой» области (1 на рис. 2).

При освещенности дуги периметра 50 лк и частоте следования импульсов 10 Гц увеличение длительности импульса более 20 мкс мало влияло на угол места для всех значений азимутального угла для обоих глаз (рис. 4). Что касается фонового освещения, то увеличение его уровня приводило к снижению  $\varphi$  (рис. 5).

Исследования периферического поля зрения проводились в соответствии с существующим стандартом при расстоянии от глаз испытуемого до дуги периметра 0,333 м. Его увеличение сопровождается уменьшением угла поля зрения вплоть до проявления закономерностей, характерных для центрального поля зрения.

### Заключение

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что скрытая работа систем передачи информации на световых лучах видимого диапазона возможна. Для этого при нулевом уровне освещенности необходимо использовать неспособность наблюдателя различать импульсный характер процесса передачи информации при больших частотах и длительностях световых импульсов (область 3 на рис. 2).

Оптический передатчик может быть выполнен, например, как «обычный» осветительный прибор.

При наличии фонового освещения, уровень которого соответствует принятым нормам, световые лучи видимого диапазона для прямого и периферического зрения человека могут стать невидимыми при определенных значениях длительности и частоты импульсов. Например, при длительности световых импульсов 5 мкс диапазон частот «невидимых» импульсов находится в пределах от 20 до 200 Гц (область 2 на рис.2).

Попытка обобщить полученные данные и установить аналитическую зависимость скважности световых импульсов от уровня фонового освещения и непосредственно параметров импульсов (длительность, интенсивность и др.) на данном этапе исследований не дала положительного результата. Дальнейшие исследования будут направлены на решение этой задачи.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Петрусь И.П., Гузенкова Е.А. Аспекты практического использования беспроводной оптической технологии передачи данных // Интернет-журнал «Науковедение». — 2014. — № 2. — <http://naukovedenie.ru/PDF/85TVN214.pdf>
2. <http://www.purelifi.com/li-fire/li-1st/>
3. Пат. 86236 України. Імпульсний оптичний бар'єр на світлових променях видимого діапазону / Браїловський В.В., Пислар І.В. — 2013. — Бюл. № 24.
4. Баранов В. Визуальная различимость миллисекундного выключения светодиодного источника света // Полупроводниковая светотехника. — 2011. — № 1. — С. 41–43.
5. Алефиренко В.М. Инженерная психология. Конспект лекций. — Минск: БГУИР, 2008.
6. William F. Ganong. Review of medical physiology. — New York : McGraw-Hill Medical, 2005.
7. ISO 8995-1:2002 (CIE S 008/E:2001)

Дата поступления рукописи  
в редакцию 10.08 2014 г.

В. В. БРАЙЛОВСЬКИЙ, М. Г. РОЖДЕСТВЕНСЬКА,  
І. В. ПИСЛАР, О. В. ПОШАК

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
E-mail: brailovsky@ukr.net

### ФІЗИОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ ПРИХОВАНОЇ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ НА ОПТИЧНОМУ ВИПРОМІНЮВАННІ ВИДИМОГО ДІАПАЗОНУ

Описано методіку та результати експериментального дослідження чутливості центрального та периферичного зору людини до світлових імпульсів видимого діапазону. Встановлено параметри світлових імпульсів, при яких можлива прихована передача інформації за допомогою світлових променів видимого діапазону.

Ключові слова: світлодіод, світловий імпульс, фонове освітлення, чутливість прямого зору, чутливість периферійного зору.

DOI: 10.15222/ТКЕА2015.1.13  
UDC 628.94

V. V. BRAILOVSKII, M. G. ROZHDESTVENSKAYA,  
I. V. PISLAR, O. V. POSHAK

Ukraine, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University  
E-mail: brailovsky@ukr.net

### PHYSIOLOGIC ASPECTS OF DESIGNING HIDDEN INFORMATION SYSTEMS BASED ON VISIBLE OPTICAL RADIATION

The paper presents the methodology and experimental results of the study of human eye sensitivity in central and peripheral vision field to the visible light pulses. The experimental results show that transmission systems based on visible rays can work in hidden mode. Conditions providing hidden transmission differ significantly for day and night light levels. At low light levels (at night) the non-perceptive nature of the pulsed light which is applied in the information transfer process should be used. In this case an optical transmitter is perceived as «usual» illuminant. In daylight, light pulse can be invisible at certain values of duration and frequency of the light pulses for central and peripheral vision. For example, light pulses with the duration of  $5 \cdot 10^{-6}$  s in the range from 20 to 200 Hz are «invisible».

Keywords: LED, light pulse, backlight, central vision sensitivity, peripheral vision sensitivity.

## REFERENCES

1. Petrus I., Guzenkova E. [Aspects of practical using of wireless optical technology data transfer]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*, 2014, no 2, <http://naukovedenie.ru/PDF/85TVN214.pdf>
2. <http://www.purelifi.com/li-fire/li-1st/>
3. Patent 86236 UA. [Pulsed optical barrier with using of visible light rays]. Brailovsky V. V., Pyslar I. V., 2013, bul. no 24.
4. Baranov V. [Visual distinction of millisecond switching of LED light source]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*, 2011, no 1, pp. 41-43. (in Russian)
5. Alefirenko V. M. *Inzhenernaya psikhologiya [Engineering psychology. Summary of lectures]*. Minsk: BSUIR, 2008, 230 p. (in Russian)
6. William F. Ganong. *Review of medical physiology*. USA, NY, McGraw-Hill Medical, 2005, 928 p.
7. ISO 8995-1:2002 (CIE S 008/E:2001)

А. И. СКРЫПНИК

Украина, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»  
E-mail: belkas@kipt.kharkov.ua

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА CdZnTe- И TlBr-ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СМЕШАННОГО БЕТА- И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

*Выполнено моделирование функции отклика CdZnTe- и TlBr-детекторов на индивидуальные источники излучения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  с помощью кода GEANT4. Получены спектры для случаев, когда перед детектором размещается бета-фильтр для поглощения электронов и без него. С помощью моделирования методом Монте-Карло найдена оптимальная толщина Al бета-фильтра для полного подавления конверсионных электронов в спектре  $^{137}\text{Cs}$ . Также получена функция отклика TlBr-детектора на смешанный источник излучения ( $^{137}\text{Cs}+^{90}\text{Sr}$ ).*

*Ключевые слова:* код GEANT4, метод Монте-Карло, моделирование, CdZnTe- и TlBr-детекторы, источники излучения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , Al бета-фильтр.

С интенсивным развитием ядерной энергетики актуальной во всем мире остается задача радиационного мониторинга окружающей среды, основными источниками загрязнения которой являются радиоактивные выбросы на предприятиях по переработке отработавшего ядерного топлива, радиохимических заводах, аварии на АЭС и т. д. Радиоактивные элементы выбрасываются в атмосферу, попадают в почву и водные ресурсы, а в дальнейшем, соответственно, и в продукты питания. Поэтому очевидна потребность в высокоэффективных и относительно дешевых приборах идентификации радионуклидов на местности.

Значительная трудность определения концентрации радионуклидов на местности с помощью гамма-спектрометрического прибора вызвана присутствием различных видов излучения — как бета, так и гамма. Комптоновское рассеяние гамма-квантов ведет к размытию исходного спектра рассеяния радионуклидов и деградации фотопиков в экспериментально измеренных спектрах. В экспериментах по восстановлению спектра от сильного гамма-излучателя на фоне низкого уровня шума может использоваться стандартная методика, суть которой связана с поиском и идентификацией фотопиков измеренного спектра. Однако на практике в большинстве случаев интенсивность измеренного сигнала от радиоактивного источника либо практически равна интенсивности радиационного фона, либо сигнал подавляется маскирующим излучением (как бета, так и гамма), что приводит к необхо-

димости изучения смешанных источников радиоактивного излучения. В случаях регистрации бета-излучения применяются химические методы разделения нуклидов или методы, основанные на измерениях и анализе спектров [1]. Более эффективными являются методы деконволюции измеренного спектра, поскольку химические методы разделения не всегда позволяют выделить чистый изотоп [2]. Реализация алгоритма восстановления и разделения измеренного спектра требует наличия измеренных либо промоделированных функций отклика детектирующего устройства на каждый индивидуальный радионуклид, который входит в состав смеси радиоактивного источника. Исследование функций отклика является ключевым моментом в изучении и применении алгоритмов деконволюции.

Целью настоящей работы было получение и исследование функций отклика CdZnTe- и TlBr-детекторов на индивидуальные источники излучения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  и смешанного гамма-бета-излучения, а также поиск оптимальной толщины Al-фильтра для полного подавления конверсионных электронов в спектре  $^{137}\text{Cs}$ .

### Проверка модели

Функции отклика CdZnTe- и TlBr-детекторов были получены с помощью моделирования прохождения гамма-квантов и электронов через детектор. Для этого использовался универсальный код GEANT4 версии 4.9.6 — набор библиотек для моделирования прохождения заряженных частиц, нейтронов и гамма-квантов через вещество [3]. Моделирование проводилось методом Монте-Карло с помощью разработанного программного кода, совмещенного с GEANT4 [4]. Эта работа разделена на две части. На первом этапе моделирования программа рассчитывает

Автор выражает свою благодарность А. В. Рыбке за предоставление экспериментальных данных и профессору М. А. Хажмурадову за его помощь в интерпретации полученных результатов.

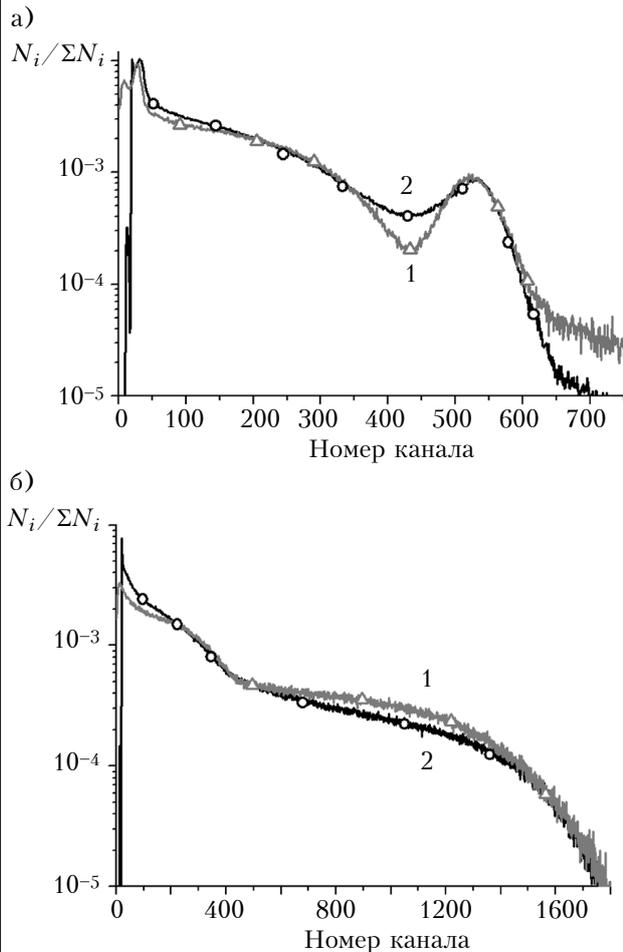


Рис. 1. Спектры  $^{137}\text{Cs}$  (а) и  $^{90}\text{Sr}$  (б), полученные путем моделирования (1) и экспериментально (2)

энергию ионизации  $E_i$ , передаваемую детектору поглощенным гамма-квантом с начальной энергией  $E_\gamma$ . На втором этапе рассчитываются значения заряда, индуцированного на контактах детектора, для каждого проваимодействовавшего фотона. В целях получения результатов, наиболее согласующихся с реальным экспериментом, в данном программном коде учитываются статистические эффекты рождения электрон-позитронных пар внутри активного объема детектора и модификация амплитуды выходного импульса под влиянием шума электронной аппаратуры и захвата носителей заряда. Модель разработана таким образом, что дает пользователю возможность управлять ее входными параметрами [4].

На рис. 1 приведены результаты моделирования отклика CdZnTe-детектора на источники излучения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , а также спектры, полученные экспериментально во время настройки измерительного стенда в [5] ( $N_i$  — количество счетов в  $i$ -м канале,  $\Sigma N_i$  — суммарное количество счетов во всех каналах). Здесь видно, что приведенные данные хорошо согласуются между собой. Положение фотопика с энергией 661,7 кэВ на промоделированном спектре  $^{137}\text{Cs}$  соответствует

экспериментальным данным. Наблюдаемые отличия спектров могут быть вызваны различными случайными факторами, но главная причина лежит, как и в [4], в упрощенном описании геометрии и химического состава элементов, рассеянных от измерительного стенда.

### Моделирование функций отклика CdZnTe- и TlBr-детекторов

Исследованы широкозонные полупроводниковые CdZnTe- и TlBr-детекторы, некоторые характеристики которых были изучены в [4, 6].

На рис. 2 показано распределение энергии, поглощенной в CdZnTe-детекторе размерами 6×6×3 мм, облученном  $^{137}\text{Cs}$ . Интервал дискретизации  $\Delta E$  равен 0,05 кэВ. Данные этого рисунка иллюстрируют комптоновскую долину и комптоновский край. Также на спектре хорошо виден фотопик с энергией 661,7 кэВ. Кроме того, поскольку не были использованы какие-либо фильтры, поглощающие электроны, на спектре присутствуют пики от конверсионных электронов с энергией 624 и 656 кэВ. Предполагается, что другие небольшие пики между комптоновским краем и фотопиком являются пиками утечки, которые соответствуют гамма-излучению из различных оболочек атомов Cd и Te.

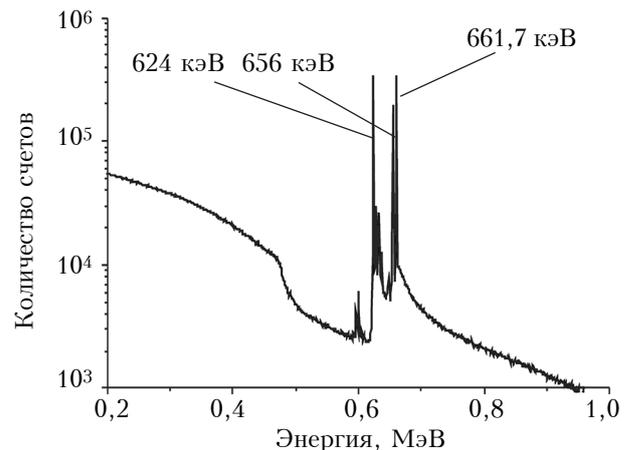


Рис. 2. Распределение энергии, поглощенной в CdZnTe-детекторе, облученном  $^{137}\text{Cs}$

При регистрации бета- и гамма-излучения широкозонными полупроводниковыми детекторами получают различные импульсы в зависимости от вида излучения. Для получения чистых гамма-спектров от источника  $^{137}\text{Cs}$  (без вклада конверсионных электронов), которые необходимы при восстановлении и разделении спектров излучения, полученных от смешанных бета- и гамма-источников, перед детектором размещается поглощающий бета-фильтр. Нами было проведено компьютерное моделирование CdZnTe-детектора, облученного  $^{137}\text{Cs}$  без использования бета-фильтра и с использованием Al-фильтра различной толщины (от 0,1 до 1,0 мм с шагом 0,1 мм). Анализ результатов показал, что полностью подавить

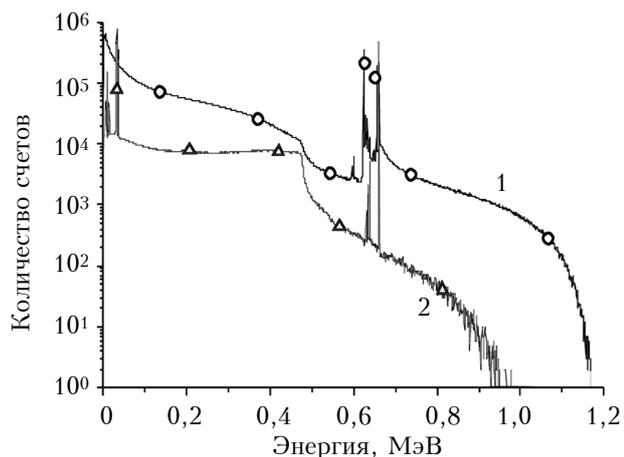


Рис. 3. Спектр энергии, поглощенной CdZnTe-детектором без фильтра (1) и при использовании Al бета-фильтра толщиной 0,5 мм (2) при облучении  $^{137}\text{Cs}$

конверсионные электроны можно с помощью Al-фильтра толщиной 0,5 мм (рис. 3).

Для определения влияния такого фильтра на вероятность рассеяния в фотопик при регистрации излучения источника  $^{137}\text{Cs}$  был промоделирован отклик CdZnTe-детектора на монохроматическое гамма-излучение с энергией 661,7 кэВ. Результаты моделирования показали, что при использовании Al-фильтра толщиной 0,5 мм вероятность рассеяния в фотопик на 0,99% меньше, чем при облучении без фильтра (рис. 4, а), т. е. исследуемый фильтр не влияет на высоту и форму фотопика с энергией 661,7 кэВ (рис. 4, б, где на оси абсцисс  $E \times \text{CCE}$  — произведение энергии на эффективность сбора заряда).

На рис. 5 представлены функции отклика CdZnTe-детектора размером 6×6×3 мм на излучение источников  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  с напряжением  $U_b=300$  В. Общий уровень шума в спектрометрической CdZnTe-системе был принят равным  $300 e^-$  и темновой ток детектора 3 нА. Значения произведения

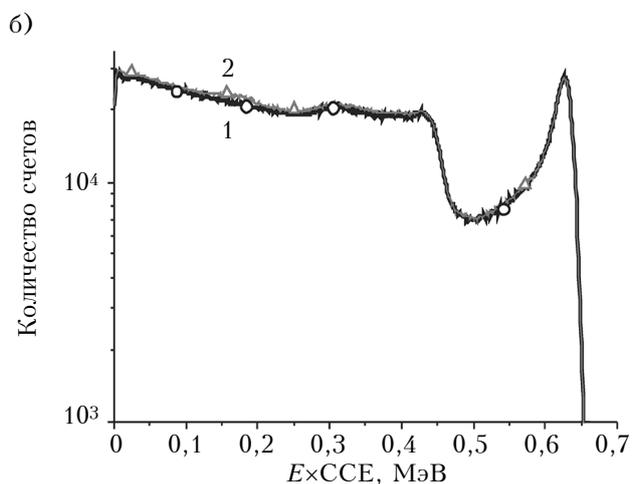
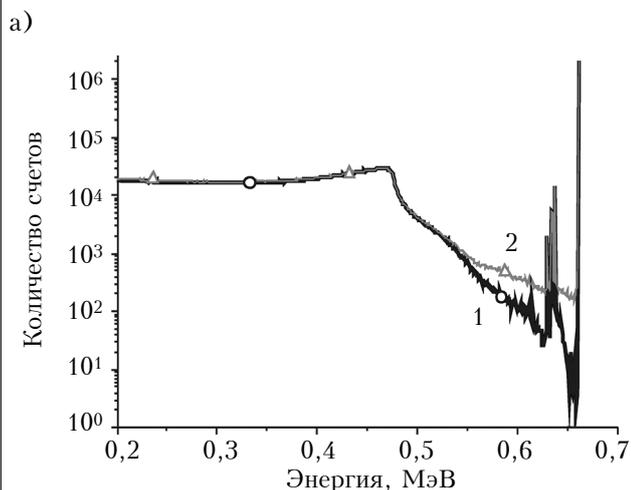


Рис. 4. Энергетические потери (а) и спектр (б) гамма-квантов с  $E_\gamma = 0,662$  МэВ, полученные при облучении CdZnTe-детектора гамма-квантами с энергией 661,7 кэВ без фильтра (1) и при использовании Al-фильтра толщиной 0,5 мм (2)

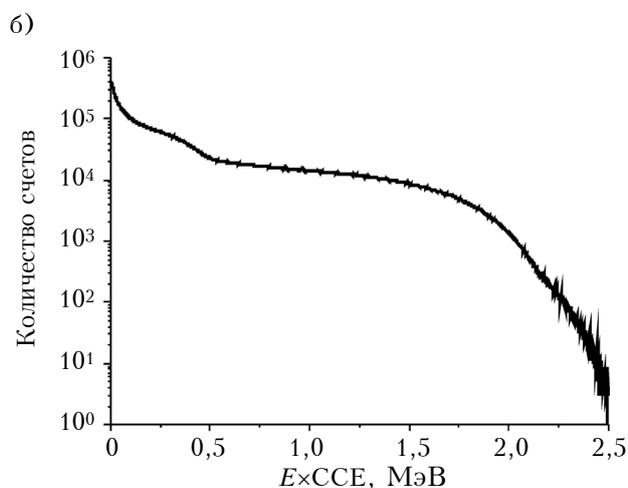
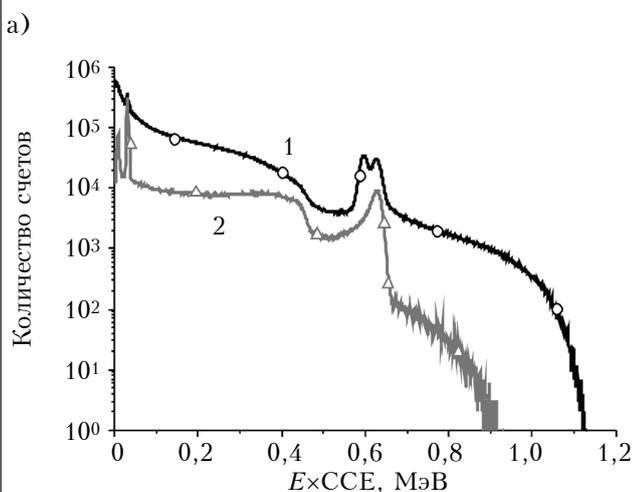


Рис. 5. Спектры энергии, поглощенной CdZnTe-детектором при облучении  $^{137}\text{Cs}$  (а) без фильтра (1) и при использовании Al-фильтра толщиной 0,5 мм (2) и при облучении  $^{90}\text{Sr}$  (б)

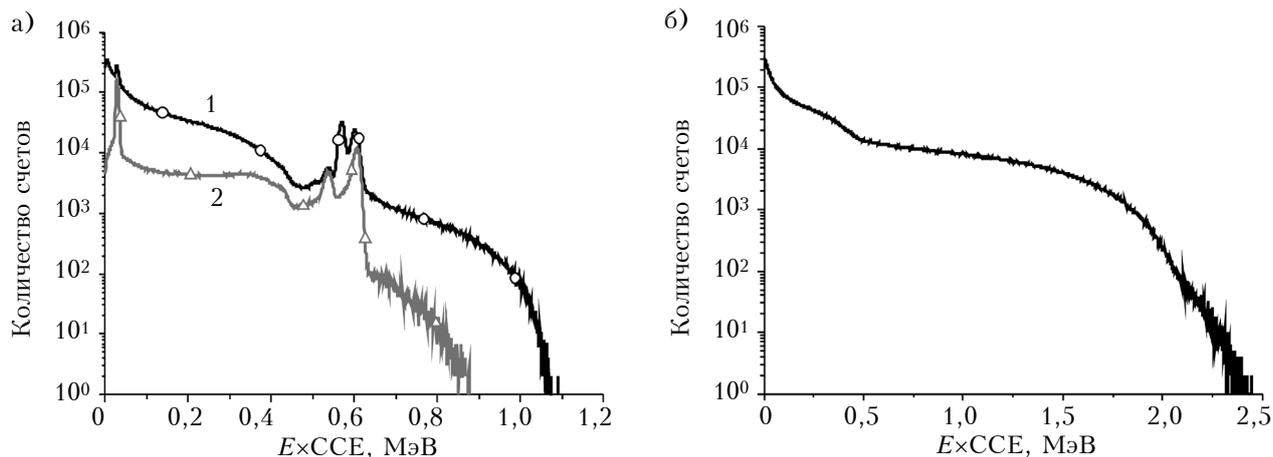


Рис. 6. Спектры энергии, поглощенной TlBr-детектором при облучении  $^{137}\text{Cs}$  (а) без фильтра (1) и при использовании Al-фильтра толщиной 0,5 мм (2) и при облучении  $^{90}\text{Sr}$  (б)

подвижности на время жизни для электронов  $(\mu\tau)_e$  и для дырок  $(\mu\tau)_h$  были установлены, соответственно,  $3 \cdot 10^{-3}$  и  $3 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/В. Кривая 1 на рис. 5, а, полученная без применения фильтра, содержит видимый фотопик с энергией 661,7 кэВ и пики от конверсионных электронов, которые накладываются друг на друга. Здесь видно, что вклад в них вносят пики утечки, однако из-за небольшой величины их невозможно различить на кривой спектра  $^{137}\text{Cs}$ . Наложение пиков может привести к переоценке фотопика, однако, как подтверждают данные рис. 4, фотопики на кривых 1 и 2 рис. 5, а совпадают.

Еще одним перспективным полупроводниковым материалом для эффективной регистрации гамма-квантов является TlBr, однако информации об экспериментах по детектированию бета-излучения с его помощью на данный момент недостаточно. Описанные выше компьютерные эксперименты были проведены для TlBr-детектора размерами 2,7×2,7×2,0 мм (рис. 6). Напряжение  $U_b$  было выбрано 400 В, общий уровень шума в спектрометрической TlBr-системе — приблизительно 400 е<sup>-</sup>. Предполагалось, что темновой ток детектора составляет 4 нА. Для того чтобы

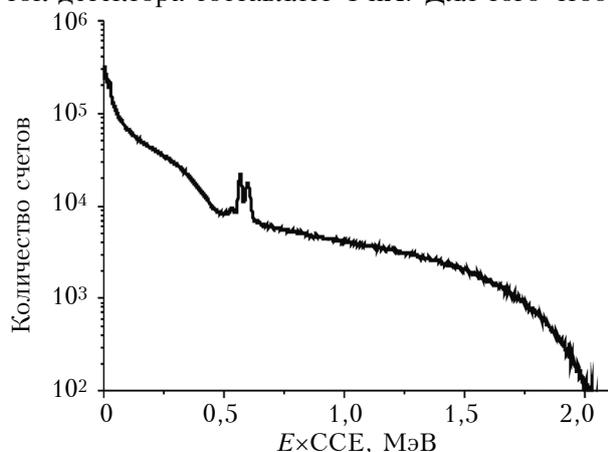


Рис. 7. Спектр энергии, поглощенной TlBr-детектором при смешанном облучении от ( $^{137}\text{Cs} + ^{90}\text{Sr}$ )-источника

получить достаточно видимые фотопики, были установлены значения  $(\mu\tau)_e$  и  $(\mu\tau)_h$ , соответственно,  $5 \cdot 10^{-4}$  и  $1 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/В.

На рис. 7 представлены функции отклика TlBr-детектора на смешанное излучение от ( $^{137}\text{Cs} + ^{90}\text{Sr}$ )-источника.

### Выводы

Таким образом, с помощью моделирования были получены и исследованы функции отклика CdZnTe- и TlBr-детекторов на индивидуальные источники излучения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , которые являются самыми распространенными загрязнителями окружающей среды, причем одними из наиболее долгоживущих и опасных радионуклидов, встречающихся в почве. Исследования показали, что имеющиеся в функциях отклика пики от конверсионных электронов могут быть полностью подавлены Al бета-фильтром толщиной 0,5 мм. Применение фильтра в случае излучения  $^{137}\text{Cs}$  приводит к уменьшению вероятности рассеяния в фотопик CdZnTe-детектором на 0,99%, TlBr-детектором — на 1,03%, а фотопик с энергией 661,7 кэВ уменьшается, соответственно, в три и в два раза.

Проведенное экспериментальное моделирование также указывает на то, что одинаковая модель детектора может применяться для детектирования как гамма- ( $^{137}\text{Cs}$ ), так и бета-излучения ( $^{90}\text{Sr}$ ). Следовательно, полупроводниковые CdZnTe- и TlBr-детекторы могут быть использованы для регистрации гамма/бета излучения от смешанных источников ( $^{137}\text{Cs} + ^{90}\text{Sr}$ ).

Полученные функции отклика детекторов на индивидуальные и смешанный источники излучения послужат основой дальнейших исследований, направленных на поиск методик восстановления и разделения спектров излучения, полученных от смешанных источников.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Nebelung C., Jähnigen P., Bernhard G. Simultaneous determination of beta nuclides by liquid scintillation spectrometry // Proc. of the Int. Conf. on Advances in Liquid Scintillation Spectrometry. — Davos, 2008. — P. 193–201.
2. Dobrin R. I., Pavelescu M., Dulama C. N., Toma Al. Measurement of multiple labeled samples by beta spectrum

unfolding // *Rom. Journ. Phys.* – 2011. – Vol. 56, N 1–2. – P. 93–102.

3. Agostinelli S. et al. Geant4: A simulation toolkit // *Nuclear instruments and methods in physics research. Section A.* – 2003. – Vol. 506, iss. 3. – P. 250–303. – DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8

4. Zakharchenko A., Rybka A., Kutny V. et al. Transport properties and spectrometric performances of CdZnTe-gamma-ray detectors // *Proc. of SPIE.* – 2012. – Vol. 8507. – P. 85071I-1–7.

5. Джур Е.А., Санин А.Ф., Божко С.А. и др. Композиционный материал для защиты радиоэлектронной аппара-

туры космических аппаратов от ионизирующего излучения // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета.* – 2013. – № 6. – С. 126–131.

6. Skrypnyk A., Zakharchenko A., Khazhmuradov M. Comparison of GEANT4 with EGSnrc for simulation of gamma-radiation detectors based on semi-insulating materials // *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations.* – 2011. – Vol. 5, iss. 56. – P. 93–100.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 14.08 2014 г.

А. І. СКРИПНИК

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

E-mail: belkas@kipt.kharkov.ua

## МОДЕЛЮВАННЯ ВІДГУКУ CdZnTe- ТА TlBr-ДЕТЕКТОРІВ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ ЗМІШАНОГО БЕТА- ТА ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ

Виконано моделювання функції відгуку CdZnTe- і TlBr-детекторів на індивідуальні джерела випромінювання  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  за допомогою коду GEANT4. Отримано спектри для випадків, коли перед детектором розміщується бета-фільтр для поглинання електронів і без нього. За допомогою моделювання методом Монте-Карло знайдено оптимальну товщину Al бета-фільтра для повного заглушення конверсійних електронів в спектрі  $^{137}\text{Cs}$ . Також отримано функції відгуку TlBr-детектора на змішане джерело випромінювання ( $^{137}\text{Cs} + ^{90}\text{Sr}$ ) з бета-фільтром і без нього.

Ключові слова: код GEANT4, метод Монте-Карло, моделювання, CdZnTe- і TlBr-детектори, джерела випромінювання  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$ , Al бета-фільтр.

DOI: 10.15222/TKEA2015.1.17

UDC 539.1.074

А. І. СКРЫПНЫК

Ukraine, Kharkov, National Science Center  
“Kharkov Institute of Physics and Technology”

E-mail: belkas@kipt.kharkov.ua

## CdZnTe- AND TlBr-DETECTORS RESPONSE SIMULATION FOR REGISTRATION OF THE MIXED BETA- AND GAMMA-RADIATION

One of the approaches for reconstructing the spectra of the mixed beta- and gamma-radiation, produced by wide band-gap semiconductor detectors, and the subsequent identification of radionuclides that are comprised in the mixture composition is a method based on various methods of spectral deconvolution. The presence of the detector response functions for each individual source of radiation is a key point in the studying such techniques. The response of TlBr- and CdZnTe-detectors to gamma-rays from  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  was simulated by Monte-Carlo method via Geant4 package. The computer experiments were conducted with using a  $\beta$ -filter and without it. It was shown that optimal thickness of the Al  $\beta$ -filter required for complete suppressing the conversion electrons in the  $^{137}\text{Cs}$  spectrum is 0.5 mm. The modification of 661.7 keV photopeaks with a using  $\beta$ -filter was investigated.

Keywords: GEANT4 code, Monte-Carlo method, simulation, CdZnTe- and TlBr-detectors,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  radiation sources, Al  $\beta$ -filter.

### REFERENCES

1. Nebelung C., Jähnigen P., Bernhard G. Simultaneous determination of beta nuclides by liquid scintillation spectrometry. *Proc. of the Intern. Conference on Advances in liquid scintillation spectrometry*, Davos, 2008, pp. 193-201.

2. Dobrin R. I., Pavelescu M., Dulama C. N., Toma A. I. Measurement of multiple labeled samples by beta spectrum unfolding. *Rom. Journ. Phys.*, 2011, vol. 56, no 1-2, pp. 93-102.

3. Agostinelli S. et al. Geant4: A simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research. Section A*, 2003, vol. 506, iss. 3, pp. 250-303, DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8

4. Zakharchenko A., Rybka A., Kutny V., Skrypnyk A., Khazhmuradov M., Fochuk P., Bolotnikov A., James R.

Transport properties and spectrometric performances of CdZnTe-gamma-ray detectors. *Proc. of SPIE*, 2012, vol. 8507, pp. 85071I-1-7.

5. Dzhur E.A., Sanin A.F., Bozhko S.A., Andrianov A.Yu., Belous V.A., Rybka A.V., Zakharchenko A.A., Borisenko V.N., Zinov'ev A.M., Kuznetsov A.P., Plisak Yu.V. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aërokosmicheskogo universiteta*, 2013, no 6, pp. 126-131. (in Russian)

6. Skrypnyk A., Zakharchenko A., Khazhmuradov M. Comparison of GEANT4 with EGSnrc for simulation of gamma-radiation detectors based on semi-insulating materials. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations*, 2011, vol. 5, iss. 56, pp. 93-100.

Д. т. н. А. Ф. КАДАЦКИЙ, к. т. н. А. П. РУСУ

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

E-mail: shurusu@mail.ru

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*Выполнен анализ и получена математическая модель энергетических процессов в импульсных преобразователях электрической энергии. Представлены результаты анализа энергетических процессов в базовых схемах преобразователей. Выполнен сравнительный анализ энергетической емкости накопительного дросселя для преобразователей постоянного и переменного тока.*

*Ключевые слова: математическая модель, энергетический процесс, импульсный преобразователь, понижающий/повышающий/инвертирующий преобразователь, АС – АС-преобразователь, DC – DC-преобразователь, преобразователь переменного/постоянного напряжения, рекуперация.*

Основным источником электрической энергии для промышленных предприятий, в том числе и предприятий связи, является сеть переменного тока, параметры качества которой определяются ГОСТ 3109-97. На практике же в различных технологических процессах требуется электрическая энергия с иными параметрами (например, при регулировании мощности электродвигателей, температуры нагревательных элементов печей и т. д.) либо параметры качества электрической энергии в точке потребления не соответствуют требованиям ГОСТ 3109-97 (например, из-за износа или перегрузки существующих энергетических сетей). В таких случаях возникает задача преобразования электрической энергии переменного тока. На сегодняшний день существуют несколько типов устройств, решающих данную задачу (электромеханические преобразователи, трансформаторы, преобразователи с двойным преобразованием) [1–3], при этом наилучшими технико-экономическими и эксплуатационными показателями могут обладать импульсные преобразователи электрической энергии (ИПЭЭ).

Основные принципы построения ИПЭЭ переменного тока были известны еще в 80-х годах XX века [4], однако на сегодняшний день импульсный способ преобразования широко используется лишь при создании ИПЭЭ постоянного тока (DC – DC-преобразователей) [1–3]. Одним из сдерживающих факторов широкого использования импульсного метода преобразования для построения ИПЭЭ переменного тока (АС – АС-преобразователей) является ограниченность и недостаточная обобщенность математических моделей, описывающих протекающие в ИПЭЭ электрические и энергетические процессы.

В известных публикациях [5–10] специфика конкретной схемы ИПЭЭ и режима ее работы отражаются отдельной, специально разрабо-

танной математической моделью. Математические модели, предложенные в [5, 6], описывают электрические процессы только в ИПЭЭ понижающего и инвертирующего типа соответственно. В [7, 8] выполнен анализ электрических и энергетических характеристик наиболее распространенных схемных решений ИПЭЭ переменного тока, однако и здесь для каждой схемы и режима работы (передача, рекуперация) используются отдельные расчетные соотношения. В [9, 10] рассмотрен только режим однонаправленной передачи энергии. Следует также отметить, что известные математические модели не учитывают автотрансформаторное и трансформаторное включение дросселя, а также (особенно при использовании матричных методов [7, 8]) недостаточно отражают суть энергетических процессов, протекающих в ИПЭЭ при преобразовании электрической энергии.

Анализ известных работ показывает, что с увеличением количества схемных решений ИПЭЭ и режимов их работы увеличивается (пропорционально) и количество математических моделей. В этом случае возникает необходимость в создании обобщенной математической модели, которая охватывала бы ИПЭЭ как постоянного, так и переменного тока, максимально возможное количество схемных решений ИПЭЭ и режимов работы силовой части.

Эффективным примером обобщенной математической модели является модель, предложенная в [11–13]. Основанная на использовании параметров тока дросселя в качестве базовых, эта модель является обобщенной к восьми наиболее распространенным схемным решениям ИПЭЭ, она допускает возможность автотрансформаторного и трансформаторного включения накопительного дросселя, работу силовой части в безразрывном и разрывном режимах. Однако данная мо-

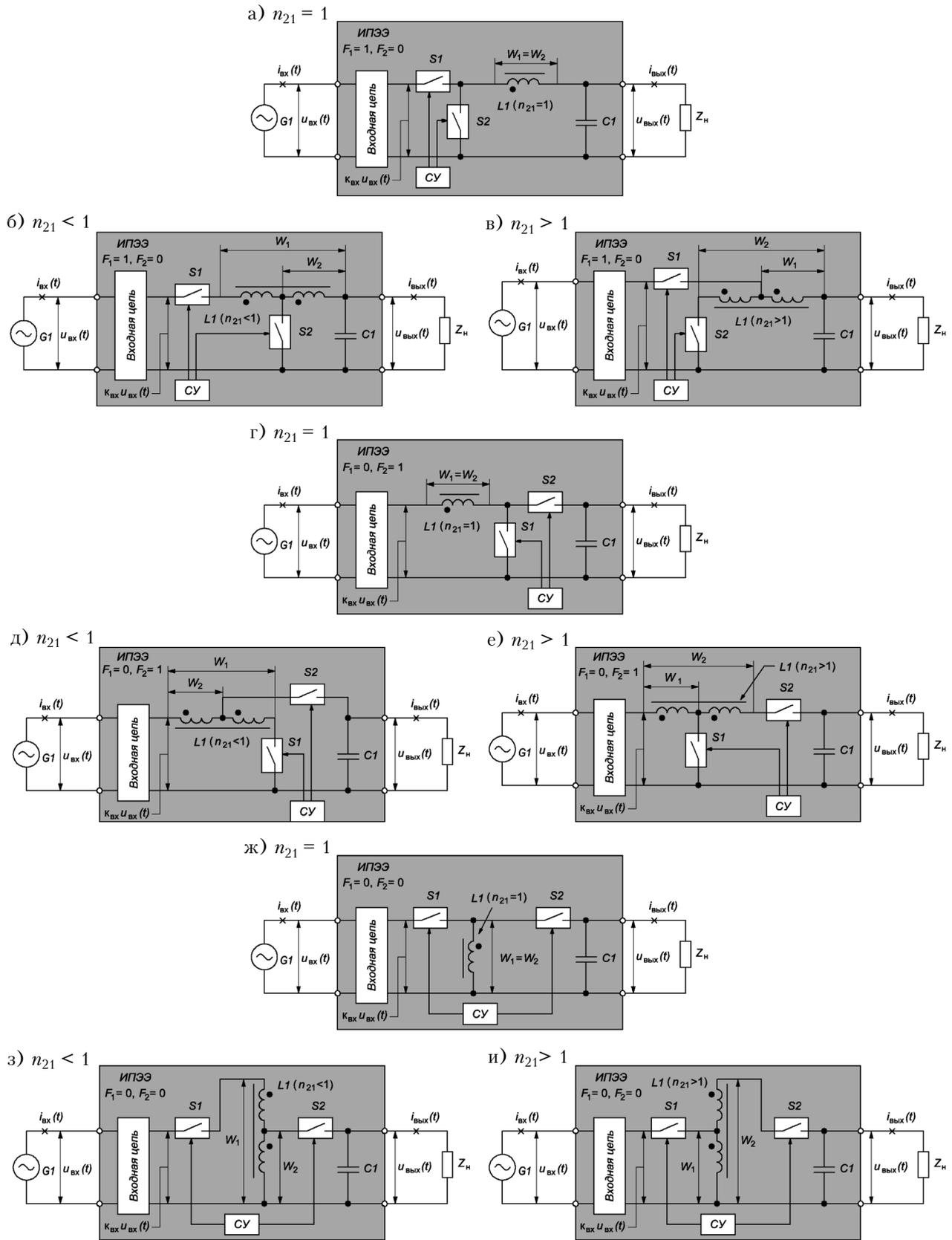


Рис. 1. Базовые схемы понижающего (а, б, в), повышающего (г, д, е) и инвертирующего (ж, з, и) ИПЭЭ переменного тока с различными коэффициентами трансформации дросселя  $n_{21}$

дель рассчитана только для ИПЭЭ постоянного тока и не учитывает особенности преобразования переменного тока.

Общим направлением работы авторов является дальнейшее развитие методов анализа электрических процессов, описанных в [11–13], для создания обобщенной математической модели ИПЭЭ как постоянного, так и переменного тока. Целью данной статьи является анализ энергетических процессов в базовых схемах импульсных преобразователей электрической энергии переменного тока и разработка их обобщенной математической модели.

Базовые схемы ИПЭЭ (базовые преобразователи) в специализированной литературе известны как преобразователи I, II и III рода (соответственно, понижающие, повышающие и инвертирующие). Они содержат одинаковое число силовых элементов (рис. 1): два силовых коммутирующих элемента  $S1$  и  $S2$  и индуктивный накопитель  $L1$ , который в общем случае может быть включен по автотрансформаторной схеме, и отличаются способом подключения дросселя на различных этапах преобразования.

В общем случае между входом ИПЭЭ и базовым преобразователем может присутствовать дополнительное звено — входная цепь с коэффициентом передачи  $k_{вх}$ . Она может выполнять двойную функцию: гальваническую развязку входа и выхода, а также согласование параметров источника первичного электропитания и базового преобразователя. Преобразовывая входное напряжение, входная цепь обеспечивает такой режим работы базового преобразователя, при котором достигаются наилучшие технико-экономические показатели ИПЭЭ в целом.

Один из возможных вариантов построения входной цепи ИПЭЭ переменного тока приведен на рис. 2. Входное напряжение с помощью инвертора, в состав которого входят ключи  $S1.1...S1.4$ , преобразуется в высокочастотное переменное напряжение, которое подается на первичную

обмотку трансформатора  $TV1$  с числом витков  $W1$ . С вторичной обмотки трансформатора  $TV1$  с числом витков  $W2$  измененное по величине высокочастотное переменное напряжение подается на управляемый выпрямитель, в состав которого входят ключи  $S2.1...S2.4$ , который выпрямляет только переменную высокочастотную составляющую напряжения, внесенную инвертором. Ключи выпрямителя и инвертора входной цепи (рис. 2) работают синхронно с ключом  $S1$  преобразователя (рис. 1). При открытии любого из ключей входной цепи  $S1.1...S1.4$ ,  $S2.1...S2.4$  (сигналы управления данными ключами показаны на рис. 2) открывается ключ  $S1$  преобразователя. В результате на интервалах открытого состояния ключа  $S1$  напряжение на входе преобразователя пропорционально напряжению источника питания  $G1$ . При этом коэффициент передачи входной цепи схемы рис. 2 равен коэффициенту трансформации  $k_{тр}$  трансформатора  $TV1$  ( $k_{вх} = k_{тр} = W2/W1$ ).

Инвертор и выпрямитель входной цепи (рис. 2) могут быть построены по любым известным схемам (мостовой, полумостовой, с выводом средней точки трансформатора). В ряде случаев входная цепь в ИПЭЭ может отсутствовать. При этом базовый преобразователь подключается непосредственно к входу ИПЭЭ, а  $k_{вх}$  принимают равным единице.

В схемах ИПЭЭ переменного тока (рис. 1) конденсатор  $C1$  предназначен для уменьшения уровня пульсаций выходного напряжения, и с энергетической точки зрения он выступает в роли небольшого аккумулятора электрической энергии. Энергетическая емкость конденсатора должна быть достаточной для поддержания выходного напряжения в заданных пределах на интервале преобразования во всем диапазоне значений тока и коэффициента мощности нагрузки. При этом максимальное значение емкости конденсатора, в отличие от ИПЭЭ постоянного тока, ограничивается максимально допустимым уровнем реактивной мощности ИПЭЭ.

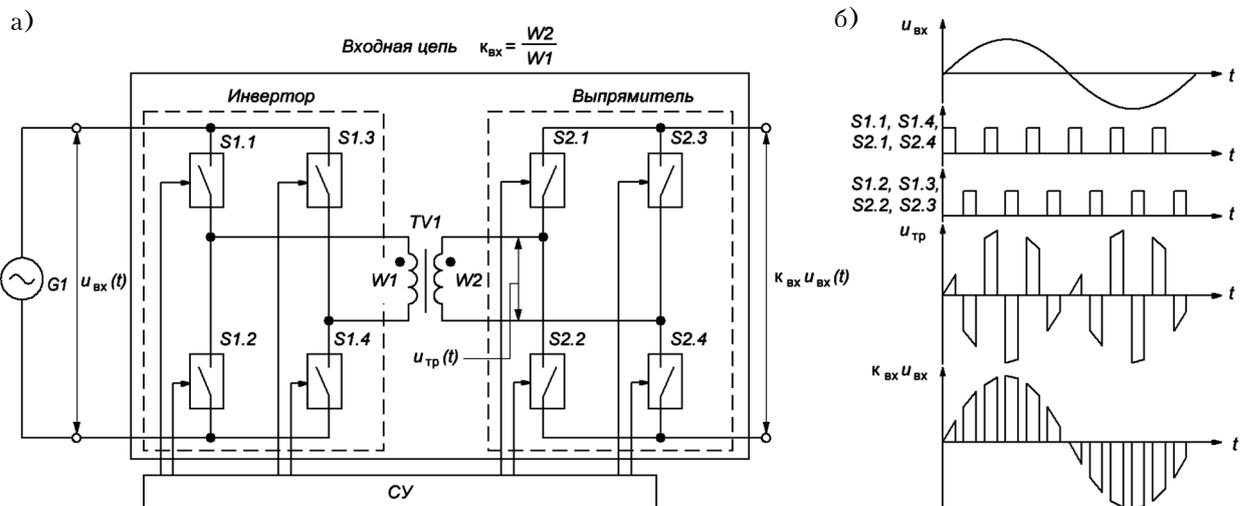


Рис. 2. Схема входной цепи с инвертором и выпрямителем мостового типа (а) и диаграммы ее работы (б)

К входу ИПЭЭ подключен источник переменного напряжения  $G1$ , к выходу — нагрузка  $Z_H$ , которая в общем случае может иметь как активную  $R_H$ , так и реактивную  $X_H$  составляющие ( $Z_H = R_H + jX_H$ ). Мгновенные значения напряжения на входе  $u_{BX}(t)$  и на выходе  $u_{ВЫХ}(t)$  рассматриваемых схем изменяется по гармоническому закону с частотой сети  $f_c$ :

$$\begin{aligned} u_{BX}(t) &= U_{BX\ m} \sin \omega_c t = \sqrt{2} U_{BX} \sin \omega_c t; \\ u_{ВЫХ}(t) &= U_{ВЫХ\ m} \sin \omega_c t = \sqrt{2} U_{ВЫХ} \sin \omega_c t, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\omega_c = 2\pi f_c$ ;  $U_{BX\ m}$ ,  $U_{ВЫХ\ m}$ ,  $U_{BX}$ ,  $U_{ВЫХ}$  — соответственно, амплитудные и действующие значения входного и выходного напряжений.

Выходной ток  $i_{ВЫХ}(t)$  преобразователя зависит от характера нагрузки и может быть сдвинут относительно выходного напряжения на некоторый угол  $\varphi$  ( $-0,5\pi \leq \varphi \leq 0,5\pi$ ):

$$\begin{aligned} i_{ВЫХ}(t) &= I_{ВЫХ\ m} \sin(\omega_c t - \varphi) = \\ &= \sqrt{2} I_{ВЫХ} \sin(\omega_c t - \varphi), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $I_{ВЫХ\ m}$ ,  $I_{ВЫХ}$  — соответственно, амплитудное и действующее значения выходного тока.

Номинальная выходная мощность преобразователя  $S_{ВЫХ\ ном}$  является произведением действующих значений номинальных выходного напряжения  $U_{ВЫХ\ ном}$  и тока  $I_{ВЫХ\ ном}$ :

$$S_{ВЫХ\ ном} = U_{ВЫХ\ ном} I_{ВЫХ\ ном}. \quad (3)$$

Мгновенное значение выходной мощности преобразователя  $s_{ВЫХ}(t)$  является произведением мгновенных значений выходных напряжения и тока преобразователя:

$$\begin{aligned} s_{ВЫХ}(t) &= u_{ВЫХ}(t) i_{ВЫХ}(t) = \\ &= U_{ВЫХ} I_{ВЫХ} [\cos \varphi - \cos(2\omega_c t - \varphi)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Мгновенное значение нормированной выходной мощности  $\bar{s}_{ВЫХ} = s_{ВЫХ}(t) / S_{ВЫХ\ ном}$  на протяжении периода сети  $T_c = 1/f_c$  при синусоидальном характере тока нагрузки представлена на **рис. 3**. Здесь видно, что при наличии сдвига фаз между напряжением и током ( $\varphi \neq 0$ ,  $X_H \neq 0$ ) мощность  $s_{ВЫХ}(t)$  принимает как положительные, так и от-

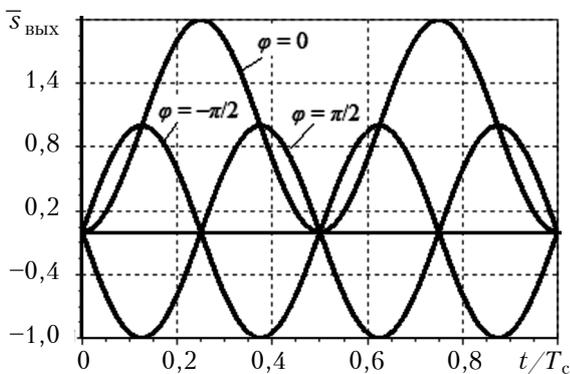


Рис. 3. Изменение нормированной выходной мощности преобразователя на интервале периода выходного напряжения

рицательные значения: положительные соответствуют передаче электрической энергии от генератора  $G1$  в нагрузку  $Z_H$  (режим передачи энергии), отрицательные — передаче энергии в обратном направлении, из нагрузки  $Z_H$  в генератор  $G1$  (режим рекуперации энергии). При отсутствии сдвига фаз ( $\varphi = 0$ ,  $X_H = 0$ ,  $Z_H = R_H$ ) электрическая энергия передается только в одном направлении — от генератора  $G1$  в нагрузку  $Z_H$ .

Максимальное и минимальное значения мощности преобразователя определяются, соответственно, по формулам

$$\begin{aligned} S_{ВЫХ\ max} &= S_{ВЫХ\ ном} (\cos \varphi + 1); \\ S_{ВЫХ\ min} &= S_{ВЫХ\ ном} (\cos \varphi - 1). \end{aligned} \quad (5)$$

Зависимости нормированных значений минимальной  $\bar{S}_{ВЫХ\ min} = S_{ВЫХ\ min} / S_{ВЫХ\ ном}$  и максимальной  $\bar{S}_{ВЫХ\ max} = S_{ВЫХ\ max} / S_{ВЫХ\ ном}$  мощности преобразователя от  $\varphi$  приведены на **рис. 4**. Из графиков видно, что максимальное мгновенное значение мощности преобразователя достигается при отсутствии сдвига фазы между выходным напряжением и током ( $\varphi = 0$ ) и соответствует двойной номинальной мощности:

$$S_{ВЫХ\ max}|_{\varphi=0} = 2S_{ВЫХ\ ном}. \quad (6)$$

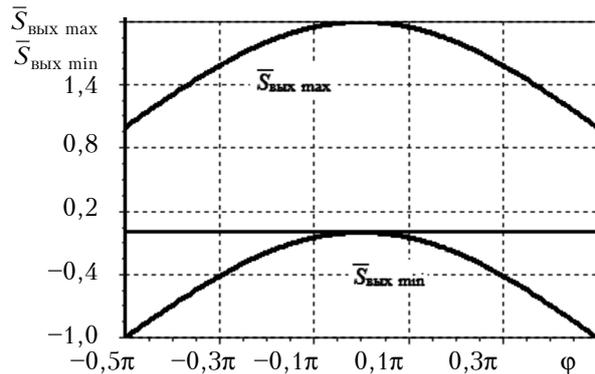


Рис. 4. Зависимости нормированных значений минимальной и максимальной выходной мощности преобразователя от величины сдвига между выходным напряжением и током

При максимальном сдвиге фазы между выходным напряжением и током ( $|\varphi| = 0,5\pi$ ) модули максимального и минимального значений мощности преобразователя равны номинальной мощности преобразователя:

$$S_{ВЫХ\ max}|_{|\varphi|=0,5\pi} = -S_{ВЫХ\ min}|_{|\varphi|=0,5\pi} = S_{ВЫХ\ ном}. \quad (7)$$

Наличие двунаправленного обмена электрической энергией между источником  $G1$  и нагрузкой  $Z_H$ , а также знакопеременные значения входного и выходного напряжений обуславливают ряд следующих особенностей схемотехнической реализации ИПЭЭ переменного тока (по сравнению с ИПЭЭ постоянного тока).

1. Проводимость ключей  $S1$  и  $S2$  должна быть двухсторонней. На практике данные ключи реализовываются путем комбинации известных полупроводниковых приборов (**рис. 5**), при этом

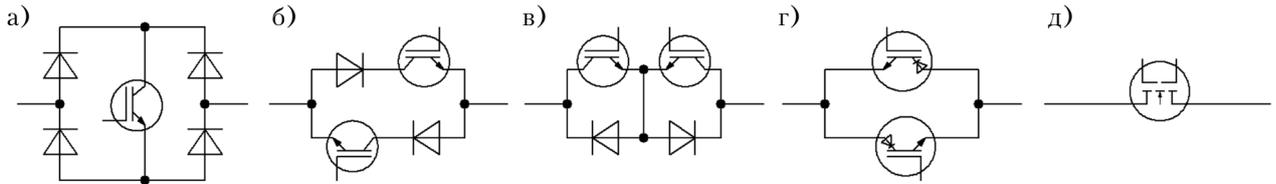


Рис. 5. Ключи с двухсторонней проводимостью на основе IGBT:

*a* – диодный мостовой ключ; *б* – параллельно включенные транзисторы; *в* – последовательно включенные транзисторы; *г* – на основе RB-IGBT; *д* – на основе BD-IGBT

перспективным здесь является использование биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) с блокировкой обратного напряжения (RB-IGBT) (рис. 5, *г*) [14] либо с двухсторонней проводимостью (BD-IGBT) (рис. 5, *д*) [15].

2. Схема должна обеспечивать непрерывное протекание тока индуктивного накопителя  $L1$ , т. е. в любой момент времени один из ключей ( $S1$  или  $S2$ ) должен находиться в проводящем состоянии. Это исключает возможность появления режима разрывных токов, возникающих в ИПЭЭ постоянного тока, и интервала паузы [11–13].

В рассматриваемых схемах (рис. 1) цикл преобразования длительностью  $T_{п} = 1/f_{п}$  (где  $f_{п}$  – частота преобразования, причем  $f_{п} \gg f_c$ , на практике  $f_{п}/f_c \geq 400$ ) состоит из двух фаз длительностью  $t_1$  и  $t_2$ :

$$t_1 + t_2 = T_{п}. \quad (8)$$

Пусть на интервале первой фазы ( $i=1$ ) ключ  $S1$  находится в проводящем состоянии, а  $S2$  – в непроводящем. В этом случае дроссель  $L1$  подключается либо непосредственно к входу (преобразователи II и III рода), либо между входом и выходом (преобразователь I рода). На интервале второй фазы ( $i=2$ ) ключ  $S1$  находится в непроводящем состоянии, а ключ  $S2$  – в проводящем. В этом случае дроссель  $L1$  подключается либо непосредственно к выходу (преобразователи I и III рода), либо между входом и выходом (преобразователь II рода). Следует отметить, что в [11–13] данные фазы соответствуют интервалам накопления (1-я фаза) и возврата (2-я фаза).

Обозначим способ подключения дросселя на интервале соответствующей фазы с помощью коэффициентов топологии схемы  $F_i$ : если дроссель подключается последовательно с входом и выходом –  $F_1 = 1$ , если непосредственно к входу или выходу –  $F_2 = 0$ . Следует отметить, что коэффициенты  $F_1$  и  $F_2$  соответствуют коэффициентам топологии схемы на интервалах накопления  $F_{п}$  и возврата  $F_{в}$  в [11–13].

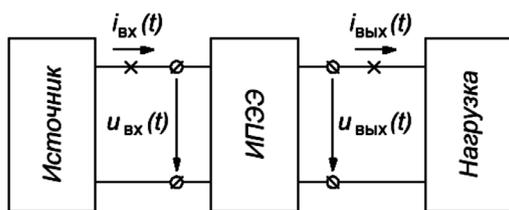


Рис. 6. Положительные направления напряжений и токов на входе и выходе ИПЭЭ

В общем случае для произвольного интервала времени на основании закона сохранения энергии можно записать

$$W_{вх} - W_{вых} - \Delta W_{нак} - W_{пот} = 0, \quad (9)$$

где  $W_{вх}$  – электрическая энергия, потребленная из источника первичного электропитания ( $W_{вх} > 0, s_{вх}(t) > 0$ ) или возвращенная в источник ( $W_{вх} < 0, s_{вх}(t) < 0$ );

$W_{вых}$  – электрическая энергия, потребляемая нагрузкой ( $W_{вых} > 0, s_{вых}(t) > 0$ ) или потребленная из нагрузки ( $W_{вых} < 0, s_{вых}(t) < 0$ );

$\Delta W_{нак}$  – суммарное изменение количества энергии в накопителях преобразователя;

$W_{пот}$  – потери энергии при преобразовании.

Формула (9) справедлива для случая, когда положительное направления напряжений и токов выбраны так, как показано на рис. 6. Временные диаграммы входных и выходных напряжений и токов, а также количество электрической энергии, потребляемой из источника (возвращаемой в источник)  $w_{вх}(t)$  и потребляемой нагрузкой (потребляемой из нагрузки)  $w_{вых}(t)$ , показаны на рис. 7 при активном и индуктивном характере нагрузки.

Из временных диаграмм (см. рис. 7, *б*) видно, что при реактивном характере нагрузки (в рассматриваемом случае – при индуктивном) мгновенные значения напряжения и тока на входе и выходе на интервалах времени  $t_2 \dots t_3$  и  $t_4 \dots t_5$  имеют одинаковые знаки (рис. 8, *б*, *г*). В этом случае мгновенные значения мощности и количество потребляемой энергии на входе и выходе положительны, т. е. электрическая энергия потребляется из источника и передается в нагрузку (режим передачи).

На интервалах времени  $t_1 \dots t_2$  и  $t_3 \dots t_4$  знаки напряжений и токов  $u_{вх}(t), i_{вх}(t)$  и  $u_{вых}(t), i_{вых}(t)$  различны (рис. 8, *а*, *в*). В этом случае мгновенные значения мощностей и количество потребляемой энергии на входе и выходе отрицательны, т. е. электрическая энергия потребляется из нагрузки и возвращается в источник (режим рекуперации). В соответствии с уравнением (9) энергетический баланс первой ( $i = 1$ ) и второй ( $i = 2$ ) фаз преобразования для рассматриваемых схем (рис. 1) при отсутствии потерь запишется как

$$\Delta W_{L i} = W_{вх i} - W_{вых i}, \quad (10)$$

где  $\Delta W_{L i}$  – изменение энергии в дросселе преобразователя;

$W_{вх i}, W_{вых i}$  – количество энергии, проходящей через вход и выход преобразователя за время протекания  $i$ -й фазы  $t_i$ .

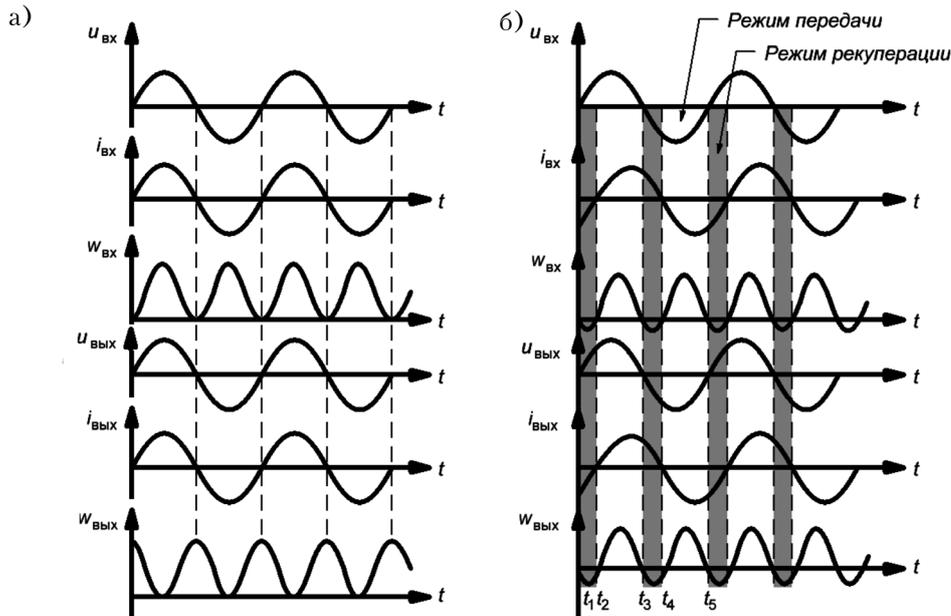


Рис. 7. Временные диаграммы напряжений, токов и потребляемой энергии при активном (а) и индуктивном (б) характере нагрузки

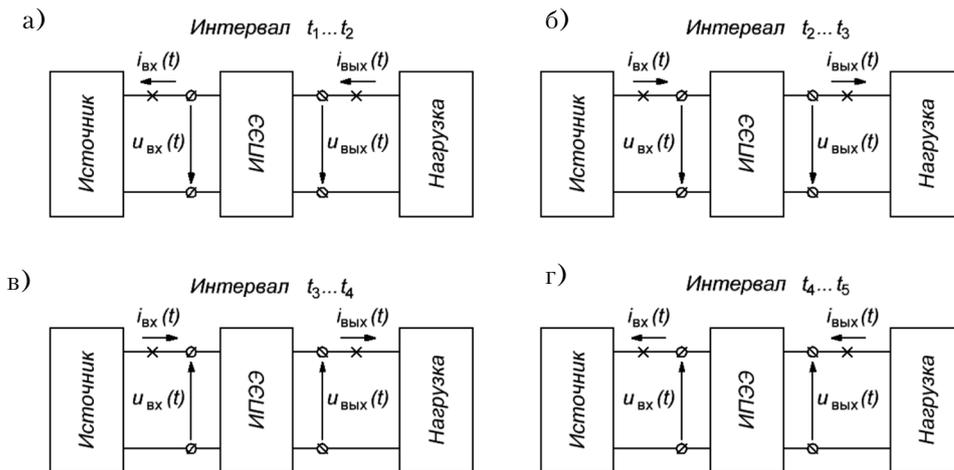


Рис. 8. Направления входных и выходных напряжений и токов при индуктивном характере нагрузки для различных интервалов времени (рис. 7, б), соответствующих режимам рекуперации (а, в) и передачи (б, г) электрической энергии

В общем случае в начале любой фазы преобразования ( $i = 1, 2$ ) дроссель  $L_1$  может содержать некоторое количество электрической энергии

$$W_{L_{нач\ i}} = 0,5 I_{L_{нач\ i}}^2 L_i, \quad (11)$$

где  $I_{L_{нач\ i}}$  — ток дросселя в начале  $i$ -й фазы;  
 $L_i$  — индуктивность дросселя на протяжении  $i$ -й фазы.

В начале первой фазы модуль тока дросселя  $I_{L_{нач1}}$  минимален в режиме передачи электрической энергии и соответствует минимальному току дросселя  $I_{min1}$  в [11–13] (рис. 9, г, е, ж, з), а в режиме рекуперации его значение максимально (рис. 9, д, и). В начале второй фазы модуль тока дросселя  $I_{L_{нач2}}$  в режиме передачи соответствует максимальному току дросселя  $I_{max2}$  в [11–13], в режиме рекуперации он максимален.

В общем случае на интервале любой фазы преобразования ( $i = 1, 2$ ) к выводам дросселя прикладывается некоторое напряжение  $u_{Li}(t)$ , под действием которого ток в дросселе к концу фазы изменяется на величину

$$\Delta I_{Li} = \frac{1}{L_i} \int_{t_{нач\ i}}^{t_{кон\ i}} u_{Li}(t) dt, \quad (12)$$

где  $t_{нач\ i}$ ,  $t_{кон\ i}$  — соответственно, время начала и конца  $i$ -й фазы преобразования.

К концу фазы преобразования ток в дросселе достигает значения

$$I_{L_{кон\ i}} = I_{L_{нач\ i}} + \Delta I_{Li}. \quad (13)$$

Количество энергии, накопленной в дросселе, к концу фазы преобразования, составляет  $W_{L_{кон\ i}} = 0,5 I_{L_{кон\ i}}^2 L_i = 0,5 (I_{L_{нач\ i}} + \Delta I_{Li})^2 L_i. \quad (14)$

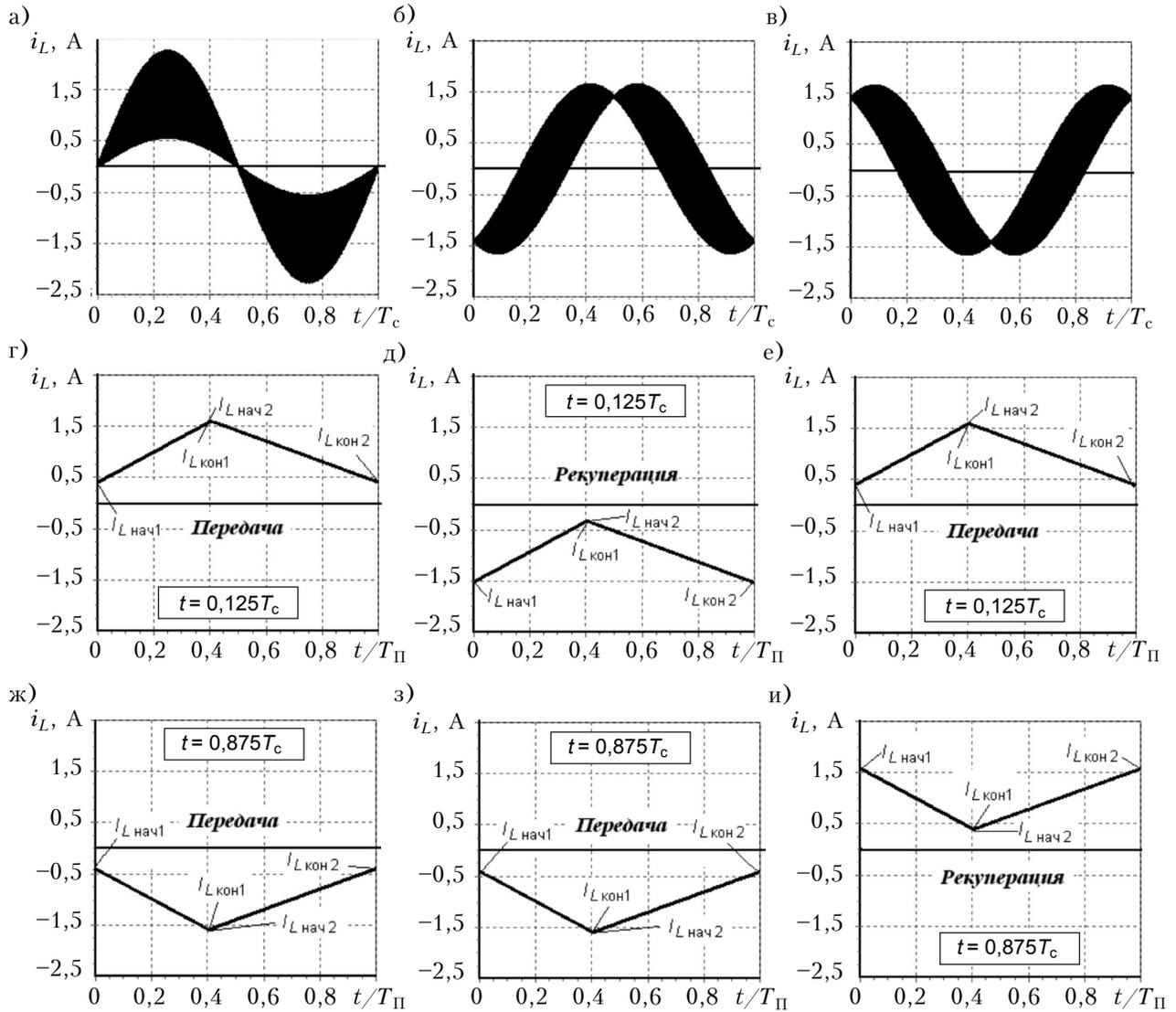


Рис. 9. Диаграммы тока дросселя  $i_L(t)$  на интервале периода сети  $T_c$  (а–в), а также на интервалах периода преобразования  $t = 0,125T_c$  (г–е) и  $t = 0,875T_c$  (ж–и) при различном характере нагрузки: а, г, ж – активном; б, д, з – индуктивном ( $\cos\varphi = 0$ ); в, е, и – емкостном ( $\cos\varphi = 0$ )

Изменение электрической энергии в дросселе за период фазы вычисляется как

$$\begin{aligned} \Delta W_{Li} &= W_{L \text{ кон } i} - W_{L \text{ нач } i} = \\ &= \Delta I_{Li} (I_{L \text{ нач } i} + 0,5\Delta I_{Li})L_i. \end{aligned} \quad (15)$$

Определим связь между токами, протекающими в дросселе на разных фазах преобразования. Пусть к концу первой фазы ток в дросселе достиг значения  $I_{L \text{ кон } 1}$ . Тогда количество электрической энергии, накопленной в дросселе, составит

$$W_{L \text{ кон } 1} = 0,5I_{L \text{ кон } 1}^2 L_1. \quad (16)$$

После коммутации в начале второй фазы преобразования количество энергии в дросселе  $W_{L \text{ нач } 2}$  при отсутствии потерь не изменяется, т. е.  $W_{L \text{ нач } 2} = W_{L \text{ кон } 1}$ , следовательно

$$i_{L \text{ кон } 1}^2 L_1 = i_{L \text{ нач } 2}^2 L_2. \quad (17)$$

В общем случае индуктивность дросселя определяется по формуле

$$L_i = N_i^2 A_L, \quad (18)$$

где  $N_i$  – количество витков на интервале  $i$ -й фазы преобразования;

$A_L$  – конструктивный параметр, зависящий от материала магнитопровода и его геометрических размеров, Гн/виток<sup>2</sup>.

Таким образом, выражение (17) с учетом (18) преобразуется к виду

$$I_{L \text{ нач } 2} = I_{L \text{ кон } 1}/n_{21} = (I_{L \text{ нач } 1} + \Delta I_{L1})/n_{21}, \quad (19)$$

где  $I_{L \text{ кон } 1}$  – ток дросселя в конце первой фазы преобразования;

$n_{21}$  – коэффициент трансформации дросселя,  $n_{21} = W_1/W_2$ ;

$W_1, W_2$  – количество витков обмотки дросселя на интервале, соответственно, первой и второй фазы преобразования (см. рис. 1).

Аналогичным образом получим

$$I_{L_{нач1}} = n_{21} I_{L_{кон2}} = n_{21} (I_{L_{нач2}} + \Delta I_{L2}). \quad (20)$$

В преобразователях постоянного напряжения в квазиустановившемся режиме изменение тока дросселя за период преобразования равно нулю. В противном случае после каждого периода преобразования в дросселе будет накапливаться некоторое количество электрической энергии, что в результате может привести к разрушению силовой части преобразователя. В преобразователях переменного напряжения в квазиустановившемся режиме к концу периода преобразования ток дросселя изменяется на некоторую величину из-за изменения тока нагрузки  $I_{ВЫХ}$ , напряжений на входе  $U_{ВХ}$  и выходе  $U_{ВЫХ}$ . В то же время, анализ относительных изменений входных и выходных напряжений ( $\Delta \bar{u}_{ВХ}(t) = |\Delta u_{ВХ}(t)/u_{ВХ\text{ср}}(t)| \cdot 100\%$ ,  $\Delta \bar{u}_{ВЫХ}(t) = |\Delta u_{ВЫХ}(t)/u_{ВЫХ\text{ср}}(t)| \cdot 100\%$ ) (рис. 10) показывает, что в области амплитудных значений они незначительны (не более 1%), что позволяет ими пренебречь. То же самое касается и относительных изменений тока.

Будем считать, что в начале первой фазы периода преобразования, следующего за рассматриваемым, ток в дросселе  $I_{L_{нач1}}$  след приблизительно равен току в дросселе в начале рассматриваемого периода  $I_{L_{нач1}}$ :

$$I_{L_{нач1}} \text{ след} \approx I_{L_{нач1}}, \quad (21)$$

где  $I_{L_{нач1}} \text{ след} = I_{L_{нач1}} + \Delta I_{L1} + n_{21} \Delta I_{L2}$ .

Очевидно, что выражение (21) справедливо при выполнении условия

$$\Delta I_{L1} = -n_{21} \Delta I_{L2}. \quad (22)$$

Напряжение, прикладываемое к дросселю на интервале первой ( $U_{L1}$ ) и второй ( $U_{L2}$ ) фаз преобразования, по аналогии с преобразователями постоянного напряжения, для рассматриваемых схем можно выразить по обобщенным формулам [11–13]

$$U_{L1} = K_{ВХ} U_{ВХ} - F_1 U_{ВЫХ};$$

$$U_{L2} = F_2 K_{ВХ} U_{ВХ} - U_{ВЫХ}. \quad (23)$$

Изменение тока дросселя на интервале первой ( $\Delta I_{L1}$ ) и второй ( $\Delta I_{L2}$ ) фаз преобразования на основании (12) с учетом (23) составит

$$\Delta I_{L1} = (K_{ВХ} U_{ВХ} - F_1 U_{ВЫХ}) t_1 / L_1;$$

$$\Delta I_{L2} = (F_2 K_{ВХ} U_{ВХ} - U_{ВЫХ}) t_2 / L_2. \quad (24)$$

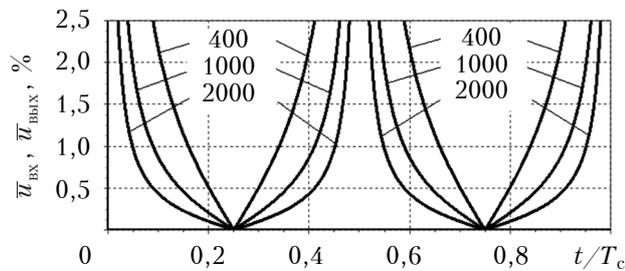


Рис. 10. Зависимости относительных изменений входного и выходного напряжений при различных соотношениях частоты преобразования  $f_{п}$  и частоты сети  $f_c$  ( $f_{п}/f_c = 400; 1000; 2000$ )

Изменение электрической энергии в дросселе за интервал первой ( $\Delta W_{L1}$ ) и второй ( $\Delta W_{L2}$ ) фазы на основании (15) с учетом (24) составит:

$$\Delta W_{L1} = (K_{ВХ} U_{ВХ} - F_1 U_{ВЫХ}) (\Delta I_{L_{нач1}} + 0,5 \Delta I_{L1}) t_1;$$

$$\Delta W_{L2} = (F_2 K_{ВХ} U_{ВХ} - U_{ВЫХ}) (\Delta I_{L_{нач2}} + 0,5 \Delta I_{L2}) t_2. \quad (25)$$

Соотношения (25), (19)–(22) позволяют записать выражения (10) в виде

$$\Delta W_{L1} = W_{ВХ1} - W_{ВЫХ1} =$$

$$= t_1 n_{21} (K_{ВХ} U_{ВХ} - F_1 U_{ВЫХ}) (I_{L_{нач2}} + 0,5 \Delta I_{L2});$$

$$\Delta W_{L2} = W_{ВХ2} - W_{ВЫХ2} =$$

$$= t_2 (F_2 K_{ВХ} U_{ВХ} - U_{ВЫХ}) (I_{L_{нач2}} + 0,5 \Delta I_{L2}), \quad (26)$$

где  $W_{ВХ1}$ ,  $W_{ВХ2}$  – количество электрической энергии, потребленной из источника (возвращенной в источник) питания, а  $W_{ВЫХ1}$ ,  $W_{ВЫХ2}$  – переданной в нагрузку (потребленной из нагрузки) на интервалах, соответственно, первой и второй фаз преобразования.

Выражения (26) отражают характер энергетических процессов, протекающих в силовой части преобразователя.

В первой фазе преобразования, которая для ИПЭЭ постоянного тока соответствует интервалу накопления, дроссель подключается к источнику первичного электропитания для потребления или передачи (в зависимости от режима – передача или рекуперация) электрической энергии  $W_{ВХ1}$ :

$$W_{ВХ1} = n_{21} K_{ВХ} U_{ВХ} (I_{L_{нач2}} + 0,5 \Delta I_{L2}) t_1. \quad (27)$$

При равенстве нулю коэффициента топологии схемы ( $F_1 = 0$ ) в обмене энергией с источником питания участвует только дроссель ( $\Delta W_{L1} = W_{ВХ1}$ ,  $W_{ВЫХ1} = 0$ ). При  $F_1 = 1$  в обмене участвует также нагрузка преобразователя, при этом количество электрической энергии  $\Delta W_{L1}$ , накопленной в дросселе, будет отличаться от (27) на величину энергии, потребленной или возвращенной нагрузкой:

$$W_{ВЫХ1} = n_{21} F_1 U_{ВЫХ} (I_{L_{нач2}} + 0,5 \Delta I_{L2}) t_1. \quad (28)$$

Аналогично, во второй фазе преобразования, которая в ИПЭЭ постоянного тока соответствует интервалу возврата, при коэффициенте топологии, равном нулю ( $F_2 = 0$ ), дроссель обменивается энергией только с нагрузкой преобразователя, величина которой составляет

$$W_{ВЫХ2} = U_{ВЫХ} (I_{L_{нач2}} + 0,5 \Delta I_{L2}) t_2, \quad (29)$$

при этом  $\Delta W_{L2} = W_{ВЫХ2}$ ,  $W_{ВХ2} = 0$ .

При коэффициенте топологии, равном единице ( $F_2 = 1$ ), аналогично первой фазе, количество электрической энергии  $\Delta W_{L2}$ , накопленной в дросселе, будет отличаться от (29) на величину энергии, потребленной или возвращенной в источник питания:

$$W_{ВХ2} = F_2 K_{ВХ} U_{ВХ} (I_{L_{нач2}} + 0,5 \Delta I_{L2}) t_2. \quad (30)$$

Определим энергетический баланс за период преобразования на основании равенства (9):

$$W_{ВХ1} + W_{ВХ2} - W_{ВЫХ1} - W_{ВЫХ2} - \Delta W_{L1} - \Delta W_{L2} = 0. \quad (31)$$

Поскольку в квазиустановившемся режиме энергия в дросселе за период преобразования не накапливается ( $\Delta W_{L1} + \Delta W_{L2} = 0$ ), запишем

$$W_{\text{вх}1} + W_{\text{вх}2} = W_{\text{вых}1} + W_{\text{вых}2}. \quad (32)$$

Уравнение (32) показывает, что за период преобразования при отсутствии потерь в зависимости от знаков слагаемых возможны три варианта работы преобразователя:

1. Электрическая энергия передается из источника питания в нагрузку, при этом  $W_{\text{вх}1} + W_{\text{вх}2} > 0$  и  $W_{\text{вых}1} + W_{\text{вых}2} > 0$ .

2. Электрическая энергия передается из нагрузки в источник питания, при этом  $W_{\text{вх}1} + W_{\text{вх}2} < 0$  и  $W_{\text{вых}1} + W_{\text{вых}2} < 0$ .

3. Электрическая энергия не передается, что характерно для режима холостого хода ИПЭЭ, который возникает в случае когда  $W_{\text{вх}1} + W_{\text{вх}2} = 0$ ,  $W_{\text{вых}1} + W_{\text{вых}2} = 0$ , причем на интервалах фаз преобразования происходит обмен энергией между дросселем, источником питания и нагрузкой преобразователя ( $W_{\text{вх}1} \neq 0$ ,  $W_{\text{вх}2} \neq 0$ ,  $W_{\text{вых}1} \neq 0$ ,  $W_{\text{вых}2} \neq 0$ ).

Подстановка в (32) выражений (26) с учетом (8) позволяет получить следующее выражение для регулировочной характеристики преобразователей:

$$\bar{U}_{2\text{КЭ}} = \frac{F_2 + k_1(n_{21} - F_2)}{1 + k_1(F_1 n_{21} - 1)}, \quad (33)$$

где  $\bar{U}_{\text{вых}}$  – относительное выходное напряжение,  $\bar{U}_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} / (k_{\text{вх}} U_{\text{вх}})$ ;  
 $k_1 = t_1 / T_{\text{п}}$  – относительная длительность первой фазы преобразования.

При известном соотношении напряжений на входе и выходе необходимые значения относительной длительности первой и второй ( $k_2 = t_2 / T_{\text{п}}$ ) фаз преобразования можно определить из (33), учитывая, что  $k_1 + k_2 = 1$ :

$$k_1 = \frac{\bar{U}_{\text{вых}} - F_2}{\bar{U}_{\text{вых}}(1 - F_1 n_{21}) - F_2 + n_{21}}; \quad (34)$$

$$k_2 = \frac{n_{21}(1 - F_1 \bar{U}_{\text{вых}})}{\bar{U}_{\text{вых}}(1 - F_1 n_{21}) - F_2 + n_{21}}.$$

Анализ формул (33) и (34) показывает, что соотношение напряжений на входе и выходе преобразователя не зависит от конкретного периода пре-

образования, а определяется параметрами схемы ( $k_{\text{вх}}$ ,  $n_{21}$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ) и соотношением длительностей фаз ( $t_1/t_2$ ), как и в случае ИПЭЭ постоянного тока.

Общее количество электрической энергии, потребленное из выходных цепей за период преобразования, составляет

$$W_{\text{вых}} = W_{\text{вых}1} + W_{\text{вых}2} = U_{\text{вых}} I_{\text{вых}} T_{\text{п}}. \quad (35)$$

Подставляя в (35) выражения (28) и (29), с учетом (34), а также с учетом того, что в комбинациях коэффициентов топологии схемы  $F_1$ ,  $F_2$  рассматриваемых преобразователей всегда присутствует ноль (см. рис. 1), а значит  $F_1 F_2 \equiv 0$ , получим

$$I_{L_{\text{нач}2}} + 0,5 \Delta I_{L2} = I_{\text{вых}} / [1 + k_1(F_1 n_{21} - 1)] = I_{\text{вых}} [\bar{U}_{\text{вых}}(1 - F_1 n_{21}) - F_2 + n_{21}] / n_{21};$$

$$I_{L_{\text{нач}1}} + 0,5 \Delta I_{L1} = n_{21} I_{\text{вых}} / [1 + k_1(F_1 n_{21} - 1)] = I_{\text{вых}} [\bar{U}_{\text{вых}}(1 - F_1 n_{21}) - F_2 + n_{21}]. \quad (36)$$

Выражения (36) связывают величины тока дросселя на интервалах фаз преобразования с выходным током  $I_{\text{вых}}$  при известном соотношении напряжений на входе и выходе ИПЭЭ и параметрах схемы ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $n_{21}$ ). Это позволяет с учетом выражений (26), (34) и (36) определить количество энергии, которое необходимо накопить в дросселе:

$$\Delta W_L = |\Delta W_{Li}| = \frac{S_{\text{вых}}}{f_{\text{п}}} \left( 1 - F_1 \bar{U}_{\text{вых}} - \frac{F_2}{\bar{U}_{\text{вых}}} \right). \quad (37)$$

При проектировании ИПЭЭ наибольший интерес представляет максимальное количество энергии, которое необходимо накапливать в дросселе за период преобразования – энергетическая емкость дросселя  $\Delta W_{L\text{max}}$ , поскольку данное значение напрямую связано с массогабаритными показателями ИПЭЭ. Для ИПЭЭ постоянного тока  $S_{\text{вых max}} = P_{\text{вых ном}} = S_{\text{вых ном}} = \text{const}$ , следовательно  $\Delta W_{L\text{max}} = (S_{\text{вых ном}} / f_{\text{п}}) (1 - F_1 \bar{U}_{\text{вых}} - F_2 / \bar{U}_{\text{вых}})$ . (38)

Для ИПЭЭ переменного тока, в соответствии с формулами (5) и (6):

$$\Delta W_{L\text{max}} = (2S_{\text{вых ном}} / f_{\text{п}}) (1 - F_1 \bar{U}_{\text{вых}} - F_2 / \bar{U}_{\text{вых}}). \quad (39)$$

Анализ выражений (38), (39) показывает, что наибольшее количество энергии, не зависящее от соотношений напряжения между входом и вы-

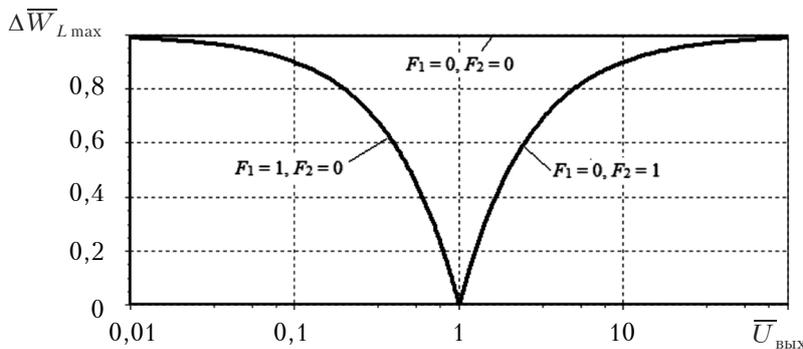


Рис. 11. Зависимости нормированной энергетической емкости дросселя  $\Delta \bar{W}_{L\text{max}} = W_{L\text{max}} / (S_{\text{вых ном}} T_{\text{п}})$  от соотношения напряжений на входе и выходе ИПЭЭ при различных значениях коэффициента топологии схемы

ходом  $\bar{U}_{\text{вых}}$ , необходимо накапливать в дросселе при  $F_1 = F_2 = 0$ , т. е. в случае инвертирующего преобразователя. Для преобразователей же понижающего ( $F_1 = 1, F_2 = 0, \bar{U}_{\text{вых}} \leq 1$ ) и повышающего ( $F_1 = 0, F_2 = 1, \bar{U}_{\text{вых}} \geq 1$ ) типов требуемая энергетическая емкость дросселя за счет использования электрической связи между входом и выходом будет меньше на величину, пропорциональную отношению входного и выходного напряжений (рис. 11).

### Выводы

Разработанная математическая модель энергетических процессов, протекающих в силовой части ИПЭЭ, позволила установить следующее.

1. Использование ключей с двухсторонней проводимостью позволяет обеспечить преобразование электрической энергии как постоянно, так и переменного тока при любом характере нагрузки с возможностью рекуперации электрической энергии в сеть постоянного или переменного тока.

2. Максимальное значение мгновенной мощности в цепи нагрузки в импульсных преобразователях переменного тока в два раза превышает номинальную мощность нагрузки в преобразователях постоянного тока.

3. Необходимая энергетическая емкость дросселя в импульсных преобразователях переменного тока в два раза превышает энергетическую емкость импульсных преобразователей постоянного тока при одинаковых значениях номинальной мощности преобразования.

4. В импульсных преобразователях понижающего и повышающего типов энергетическая емкость дросселя зависит от соотношения напряжений на входе и выходе, при этом она меньше, чем в преобразователях инвертирующего типа, где энергетическая емкость дросселя не зависит от соотношения напряжений на входе и выходе.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учеб. пособие для бакалавров. — Москва: Юрайт, 2012.
2. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: профессиональные решения. — Москва: Солон-пресс, 2011.
3. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. — Москва: Техносфера, 2005.
4. Кобзев А.В., Лебедев Ю.М., Михайличенко Г.Я. и др. Стабилизаторы переменного напряжения с высокочастотным широтно-импульсным регулированием. — Москва: Энергоатомиздат, 1986.

5. Jin Nan, Tang Hou-Jun, Bai Liang-Yu, Geng Xin, Yang Xiao-Liang. Analysis and control of two switches AC chopper voltage regulator // WSEAS Transactions on Circuits and Systems. — 2010. — Vol. 9, N 4. — P. 208–217.

6. Jin Nan, Tang Hou-jun, Liu Wei1, Ye Peng-sheng. Analysis and control of buck-boost chopper type AC voltage regulator // Proceed. of IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2009). — China, Wuhan. — 2009. — P. 1019–1023.

7. Obuhov A., Otchenash V., Zinoviev G. Buck-boost AC-AC voltage controllers // Proceed. of 9th Int. Conf. on Power Electronics and Motion Control (EPE-PEMC 2000). — Slovak Republic, Ko ice. — 2000. — P. 2-194–2-197.

8. Обухов А.Е. Бестрансформаторные повышающе-понижающие регуляторы переменного напряжения в электротехнических системах кондиционирования качества электрической энергии / Автореф. дис. канд. техн. наук. — Новосибирский государственный технический университет, 2003.

9. Soeiro T., Petry C.A., Fagundes C.S., Barbi I. Direct AC-AC converters using commercial power modules applied to voltage restorers // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2011. — Vol. 58, N 1. — P. 278–288.

10. Xin Geng, Hou-Jun Tang, Nan Jin, Jian-Yu Lan. Direct buck-type AC-AC converters using VSC method // Przegląd Elektrotechniczny. — 2013. — N 01b. — P. 257–261.

11. Кадацкий А.Ф., Русу А.П. Анализ электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения с широтно-импульсным регулированием // Электричество. — 2005. — № 9. — С. 43–54.

12. Кадацкий А.Ф., Русу А.П. Математическая модель электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения с широтно-импульсным методом регулирования // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. — 2004. — № 3. — С. 10–16.

13. Кадацкий А.Ф., Русу А.П. Действующие значения токов элементов силовых каналов импульсных преобразователей постоянного напряжения с широтно-импульсным методом регулирования // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. — 2005. — № 1. — С. 11–17.

14. Климов В., Климова С. Двухнаправленные ключи в матричных структурах преобразователей переменного тока // Силовая электроника. — 2008. — № 4. — С. 58–61.

15. Bill Alexander. New topology cuts size, improves performance of PV inverters (inverters content from power electronics) [Электронный ресурс]. — Режим доступа к ресурсу: <http://powerelectronics.com/inverters/new-topology-cuts-size-improves-performance-pv-inverters> (2012).

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 07.07 2014 г.*

*А. Ф. КАДАЦЬКИЙ, О. П. РУСУ*

*Україна, Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова  
E-mail: shurusu@mail.ru*

## АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЗМІННОГО СТРУМУ

*Виконано аналіз та отримано математичну модель енергетичних процесів в імпульсних перетворювачах електричної енергії. Представлено результати аналізу енергетичних процесів у базових схемах*

перетворювачів. Виконано порівняльний аналіз енергетичної ємності накопичувального дроселя для перетворювачів постійної та змінної напруги.

**Ключові слова:** математична модель, енергетичний процес, імпульсний перетворювач, знижувальний/підвищувальний/інвертувальний перетворювач, AC–AC-перетворювач, DC–DC-перетворювач, перетворювач змінної/постійної напруги, рекуперація.

DOI: 10.15222/ТКЕА2015.1.22  
UDC 621.314

A.F. KADATSKY, A.P. RUSU

Ukraine, O. S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications  
e-mail: shurusu@mail.ru

## ANALYSIS OF ENERGY PROCESSES IN PULSE CONVERTERS OF AC ELECTRIC POWER

*The article presents the analysis of energy processes in switched-mode AC-AC converters of buck, boost and buck-boost types. The mathematical model of energy processes is obtained. The mathematical model is generalized to DC-DC and AC-AC converters, to three basic types of converters and considers possibility of autotransformer inclusion of an inductor.*

*It is shown that the use of bi-directional switches allows both DC and AC conversion of electrical energy regardless of the load type and also supports recuperation of electrical energy back to the source. It is shown that the maximum value of instant power in a load circuit in AC–AC converters exceeds twice the rated value of load power in comparison with DC–DC converters. It is shown that the energy capacity of an inductor in AC–AC converters exceeds twice the energy capacity of DC–DC converters at the identical rated power of conversion. It is shown that the energy capacity of an inductor in converters of buck and boost types depends on the ratio of input and output voltage. Also, the energy capacity of an inductor in converters of buck-boost type does not depend on the ratio of input and output voltage. It is shown that the energy capacity of an inductor in converters of buck and boost types is lower than the energy capacity of an inductor in the converter of buck-boost type.*

**Keywords:** mathematical model, energy processes, switched-mode converters, buck converter, boost converter, buck-boost converter, AC–AC converter, DC–DC converter, recuperation.

### REFERENCES

- Zinov'ev G.S. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. Moscow, Yurayt, 2012, 667 p. (in Russian)
- Semenov B.Yu. *Silovaya elektronika: professional'nye resheniya* [Power electronics: professional solutions]. Moscow, Solon-Press, 2011, 416 p. (in Russian)
- Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Transistor converter equipment]. Moscow, Tehnosfera, 2005, 632 p. (in Russian)
- Kobzev A.V., Lebedev Yu.M., Mikhailichenko G.Ya., Semenov V.D., Sidonskii I.B., Taraskin A.V. *Stabilizatory peremennogo napryazheniya s vysokochastotnym shirotno-impul'snym regulirovaniem* [AC voltage stabilizers with high-frequency pulse-width regulation]. Moscow, Energoatomizdat, 1986, 152 p. (in Russian)
- Jin Nan, Tang Hou-Jun, Bai Liang-Yu, Geng Xin, Yang Xiao-Liang. Analysis and control of two switches AC chopper voltage regulator. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 2010, vol. 9, no 4, pp. 208-217.
- Jin Nan, Tang Hou-jun, Liu Wei1, Ye Peng-sheng. Analysis and control of buck-boost chopper type AC voltage regulator. *Proceed. of IEEE 6<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2009)*, China, Wuhan, 2009, pp. 1019-1023.
- Obuhov A., Otchenash V., Zinoviev G. Buck-boost AC-AC voltage controllers. *Proceed. of 9<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics and Motion Control (EPE-PEMC 2000)*, Slovak Republic, Ko ice, 2000, pp. 2-194–2-197.
- Obuhov A.E. [Transformerless buck-boost regulators AC voltage in electrotechnical systems of conditioning electric power quality]. *Diss. dokt. tekhn. nauk*, Novosibirsk State Technical University, 2003. (in Russian)
- Soeiro T., Petry C.A., Fagundes C.S., Barbi I. Direct AC–AC converters using commercial power modules applied to voltage restorers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no 1, pp. 278-288.
- Xin Geng, Hou-Jun Tang, Nan Jin, Jian-Yu Lan. Direct buck-type AC-AC converters using VSC method. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2013, no 01b, pp. 257-261.
- Kadatsky A.F., Rusu A.P. [The analysis of electrical processes in pulse converters of constant voltage with a pulse-width method of regulation]. *Elektrichestvo*, 2005, no 9, pp. 43-54. (in Russian)
- Kadatsky A.F., Rusu A.P. [Mathematical model of electrical processes in pulse converters of constant voltage with a pulse-width method of regulation]. *Scientific works of ONAT n.a. Popov*, 2004, no 3, pp. 10-16. (in Russian)
- Kadatsky A.F., Rusu A.P. [Effective values currents of elements powered channels of pulse converters constant voltage with a pulse-width method of regulation] *Scientific works of ONAT n.a. Popov*, 2005, no 1, pp. 11-17. (in Russian)
- Klimov V., Klimova S. [Bidirectional switches in matrix structures AC converters]. *Silovaya elektronika*, 2008, no 4, pp. 58-61. (in Russian)
- Bill Alexander. New topology cuts size, improves performance of PV inverters | *Inverters content from power electronics*. Available at: <http://powerelectronics.com/inverters/new-topology-cuts-size-improves-performance-pv-inverters> (accessed 2012).

В. В. БАСАНЕЦ<sup>1</sup>, В. С. СЛЕПОКУРОВ<sup>2</sup>, к. ф.-м. н. В. В. ШИНКАРЕНКО<sup>2</sup>, Р. Я. КУДРИК<sup>3</sup>,  
к. т. н. Я. Я. КУДРИК<sup>2</sup>

Украина, г. Киев, <sup>1</sup>НИИ «Орион», <sup>2</sup>Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ;  
<sup>3</sup>Львовський національний університет імені Івана Франко

E-mail: kudryk@isp.kiev.ua

## ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ Au–Ti–Pd–n-Si ДЛЯ ЛАВИННО-ПРОЛЕТНЫХ ДИОДОВ

*Исследовано удельное сопротивление омического контакта Au–Ti–Pd–n-Si и механизм токопереноса в интервале температур 100–360 К. Предложен способ уменьшения погрешности определения удельного контактного сопротивления на основе анализа статистических зависимостей измеренных величин. Измеренные значения удельного контактного сопротивления лежат в диапазоне  $(0,9–2) \cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup>. При использовании температурной зависимости удельного контактного сопротивления установлено, что в омическом контакте с высотой барьера 0,22 эВ в температурном диапазоне 100–200 К преобладает полевой механизм токопереноса, в диапазоне 200–360 К – термополевой с энергией активации примерно 0,08 эВ.*

*Ключевые слова:* удельное сопротивление, омический контакт, лавинно-пролетный диод, термополевая эмиссия.

Развитие полупроводниковой микроволновой электроники требует повышения выходной мощности твердотельных генераторов микроволнового диапазона длины волны. Современные лавинно-пролетные диоды (ЛПД) работают в этом диапазоне в окрестности значений выходной мощности порядка 10 Вт и более в импульсном режиме [1, 2]. Достижение таких исходных параметров возможно при наличии стабильного омического контакта с многослойной металлизацией с удельным контактным сопротивлением  $\rho_c$  не более  $10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup> [3, с. 100].

Как правило, для создания омических (невыпрямляющих) контактов используют переходной слой силицида металла, который образуется при напылении металлизации на подогретую подложку в результате взаимодействия металла с полупроводником. Силицид обладает свойствами твердого раствора, и некоторые его электрофизические параметры отличаются от параметров металла и полупроводника [4]. Поскольку стабильность сформированного контакта в значительной мере зависит от стабильности свойств переходного слоя, контроль величины удельного контактного сопротивления и механизмов токопереноса в омических контактах необходим для прогнозирования стабильности работы ЛПД [5, 6]. В данной работе рассмотрены механизмы токопереноса в невыпрямляющих контактах Au–Ti–Pd–n-Si в температурном диапазоне от 100 до 360 К, особенности температурной зависимости  $\rho_c$  и способ увеличения точности его оценки при статистических измерениях методом Кокса–Стрека.

### Образцы и методы исследования

Были исследованы омические контакты на основе сильнолегированного кремния с концентрацией легирующей примеси (мышьяка)  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Омический контакт формировали на кремниевой подложке после ее фотонной очистки. На подогретую до 350°C подложку магнетронным напылением в одном технологическом цикле последовательно наносили слои металлизации: Pd (20 нм) – Ti (60 нм) – Au (150 нм). На фронтальной стороне методом фотолитографии формировали вертикальную тестовую структуру с несколькими радиальными контактами для измерения удельного контактного сопротивления методом Кокса–Стрека [7]. Измерение сопротивления контактов шаблона производилось с помощью автоматизированного комплекса на

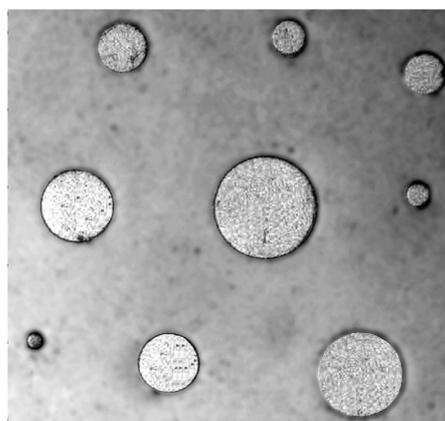


Рис. 1. Шаблон для измерения контактного сопротивления методом Кокса–Стрека

основе зондовой станции «Зонд-А5» и вольтметра В7-46/1.

Шаблон для фотолитографии (рис. 1) содержал девять контактов различного диаметра (230, 200, 165, 135, 115, 95, 80, 55 и 35 мкм). Тыльный омический контакт был сплошным. Исследованы контакты двух типов, различающиеся толщиной пленки золота: I – со слоем Au толщиной 0,15 мкм, нанесенным магнетронным способом; II – с дополнительным, гальванически осажденным толстым (1,5 мкм) слоем Au.

Общее сопротивление вертикальной структуры определяется уравнением [7]

$$R = \frac{4\rho_c}{\pi d^2} + \frac{\rho_s}{\pi d} \arctg \frac{4t}{d} + R_t, \quad (1)$$

где  $\rho_s$  – удельное сопротивление полупроводника;  
 $t$  – толщина слоя полупроводника;

$R_t$  – сопротивление тыльного контакта;

$d$  – диаметр контакта.

Первое слагаемое в формуле (1) отражает вклад удельного контактного сопротивления в общее сопротивление структуры, второе – сопротивления растекания в полупроводнике. Сопротивление тыльного контакта  $R_t$  в данном случае будем считать малой величиной.

Значение удельного контактного сопротивления можно рассчитать, построив график зависимости  $R\pi d^2/4 = f(d/4 \cdot \arctg(4t/d))$ , аппроксимируя ее прямой вида  $y=a+bx$ , откуда получим  $a=\rho_c$  и  $b=\rho_s$ .

### Результаты и обсуждение

На основе расчетов удельного контактного сопротивления контактов I и II типов всех шаблонов (соответственно, 101 и 78 шаблонов) были построены гистограммы распределения  $\lg\rho_c$ , которые показали значительный разброс значений  $\rho_c$  (см. рис. 2, а, рис. 3, а). Для определения причины этого разброса была построена корреляционная зависимость между значениями  $\rho_c$  и  $\rho_s$ , найденными для каждого шаблона отдельно. Эта корреляция оказалась отрицательной с коэф-

фициентом  $-0,7$ . В случае положительной корреляции можно было бы сделать вывод о влиянии на  $\rho_c$  разброса значений  $\rho_s$ . Отрицательная же корреляция может указывать на то, что некоторая погрешность определения удельного сопротивления полупроводника влияет на величину  $\rho_c$  (см. уравнение (1)). В таком случае, очевидно, что использование наиболее вероятного для всей выборки значения удельного сопротивления полупроводника  $\rho_s$  вместо полученных для каждого шаблона позволит минимизировать эту погрешность и увеличить точность определения  $\rho_c$  (рис. 2, б, рис. 3, б).

Полученные гистограммы хорошо описываются функцией Гаусса

$$y = \frac{C}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

что может быть объяснено нормальным распределением высоты барьера ( $x_0$  – наиболее вероятное значение величины;  $\sigma^2, C$  – дисперсия и амплитуда распределения соответственно).

Путем аппроксимации кривыми Гаусса гистограмм распределения удельного контактного сопротивления, приведенных на рис. 2 и 3, были получены наиболее вероятные значения  $\rho_c$ , которые составили: при расчетах стандартным способом –  $(6,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-6}$  и  $(11 \pm 2) \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup> для образцов I и II типа соответственно, при использовании в расчетах  $\bar{\rho}_s$  –  $(21,4 \pm 0,9) \cdot 10^{-6}$  и  $(9,92 \pm 0,80) \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>, при этом стандартное отклонение уменьшилось в 1,6 и 2,1 раза для образцов I и II типа соответственно. Следует отметить, что указанные значения  $\rho_c(\bar{\rho}_s)$  хорошо согласуются с соответствующими данными других авторов, полученными при исследованиях образцов с концентрацией легирующей примеси в n-Si порядка  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, которые обобщены в обзоре [8].

Результаты аппроксимации гистограмм распределения логарифмов удельного сопротивления полупроводника  $\rho_s$  и удельного контактного сопротивления  $\rho_c$  функцией Гаусса приведены в таблице.

Параметры аппроксимации гистограмм распределения значений  $\lg\rho_s$  и  $\lg\rho_c$  функцией Гаусса для образцов I и II типа

Тип образца	Величина	Значение величины		Параметры распределения Гаусса	
		среднее арифметическое	наиболее вероятное	$x_0$	$\sigma$
I	$\lg\rho_s$	-2,28	-2,26	-2,27	0,246
	$\lg\rho_c$	-5,22	-5,12	-5,17	0,441
	$\lg\rho_c(\bar{\rho}_s)$	-4,67	-4,66	-4,66	0,0883
II	$\lg\rho_s$	-2,31	-2,28	-2,30	0,526
	$\lg\rho_c$	-4,97	-4,91	-4,93	0,273
	$\lg\rho_c(\bar{\rho}_s)$	-5,00	-5,02	-5,01	0,152

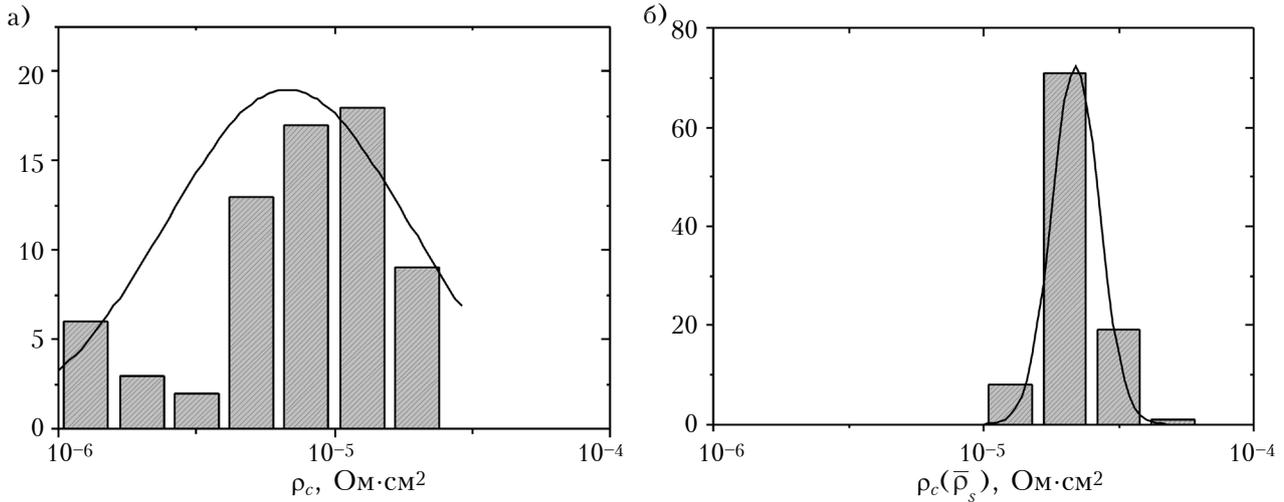


Рис. 2. Гистограммы распределения значений  $\rho_c$  (а) и  $\rho_c(\bar{\rho}_s)$  (б) для контактов с магнетронным напылением Au

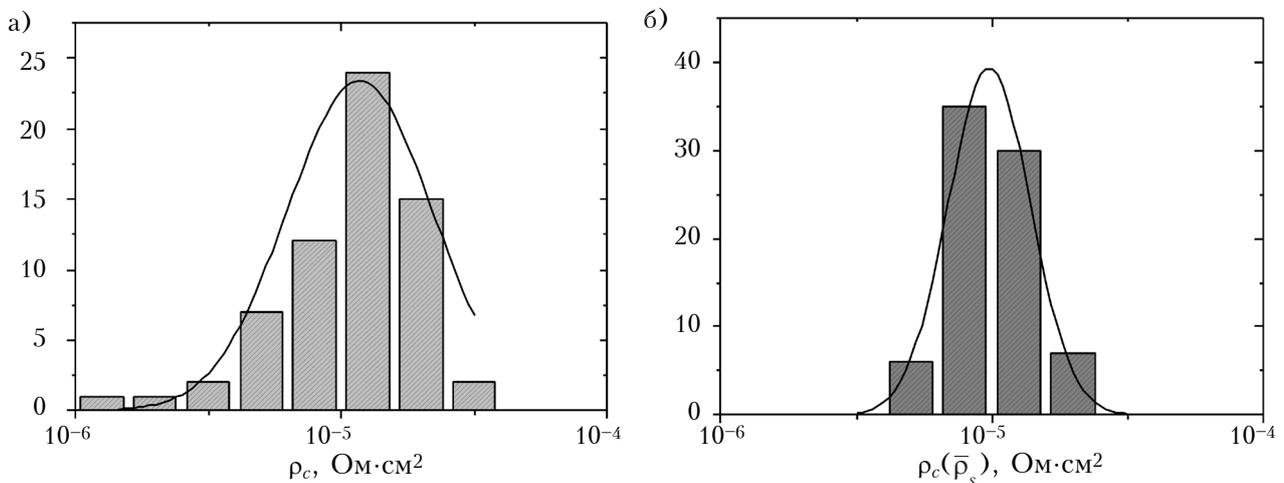


Рис. 3. Гистограммы распределения значений  $\rho_c$  (а) и  $\rho_c(\bar{\rho}_s)$  (б) для контактов с гальваническим нанесением Au

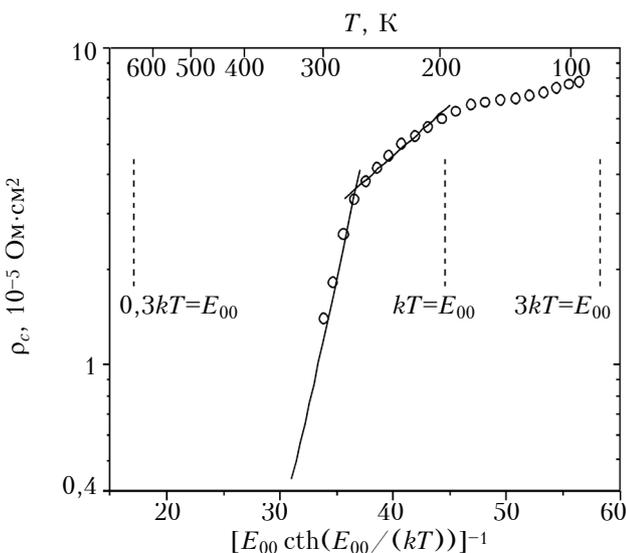


Рис. 4. Температурные зависимости  $\rho_c$ , построенные в координатах термополевой эмиссии, для контактов с разной величиной сформированного потенциального барьера

Для определения механизма токопереноса в контакте проведено исследование температурной зависимости удельного контактного сопротивления. Поскольку концентрация доноров в полупроводнике достаточно велика (около  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ ), в низкотемпературной области механизм токопереноса должен быть полевым. На графике зависимости  $\rho_c(T)$ , приведенном на рис. 4, это подтверждается наличием участков в диапазоне температур 100–200 К, где удельное контактное сопротивление практически не изменяется.

При повышении температуры вероятность возникновения термополевой и термоэлектронной эмиссии растет [9]. Для определения преобладающего механизма токопереноса воспользуемся параметром Падовани – Стреттона  $E_{00}$  [10]:

$$E_{00} = \frac{\hbar}{2} \sqrt{\frac{N_d}{m^* \epsilon_s}} \approx 0,017 \text{ эВ}, \quad (3)$$

где  $\hbar$  — модифицированная постоянная Планка;

$m^*$  — эффективная масса электрона;

$\epsilon_s$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника;

$N_d$  — концентрация легирующей примеси.

При выполнении условия  $E_{00} \gg kT$  (где  $k$  — постоянная Больцмана) реализуется *полевой механизм токопереноса*. В этом случае удельное контактное сопротивление  $\rho_F$  рассчитывается по формуле [9]

$$\rho_F \approx \frac{2\sqrt{\epsilon_s \epsilon_0 m^*}}{\hbar} \frac{\phi_b}{\sqrt{N_d}}, \quad (4)$$

где  $\phi_b$  — высота барьера.

В случае когда  $E_{00} \approx kT$ , реализуется термополевой механизм токопереноса, и плотность тока через контакт описывается уравнением [9]

$$J_{TF} = J_S \exp(qV/E_0) \cdot [1 - \exp(qV/(kT))], \quad (5)$$

где  $q$  — заряд электрона;

$V$  — напряжение;

$E_0 = E_{00} \operatorname{cth}(qE_{00}/(kT))$ ;

$J_S$  — плотность тока насыщения,

$$J_S = \frac{J_m \sqrt{\pi E_{00} (\phi_b - V - E_f)}}{kT \operatorname{ch} \frac{E_{00}}{kT}} \exp\left[-\frac{\phi_b - E_f}{E_0}\right];$$

$J_m$  — плотность тока при условии плоских зон,

$J_m = A^* T^2 \exp(-qE_f/(kT))$ ;

$A^*$  — модифицированная постоянная Ричардсона;

$E_f$  — положение уровня Ферми.

В этом случае удельное контактное сопротивление  $\rho_{TF}$  находим следующим образом:

$$\rho_{TF} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\partial V}{\partial J_{TF}} = \frac{k^2}{qA^* \sqrt{\pi E_{00} (\phi_b - E_f)}} \times \operatorname{ch} \frac{E_{00}}{kT} \cdot \exp\left[\frac{\phi_b - E_f}{E_{00} \operatorname{cth} \frac{E_{00}}{kT}} + \frac{E_f}{kT}\right]. \quad (6)$$

При условии  $E_{00} \ll kT$  реализуется *термоэлектронный механизм токопереноса*, а формула для расчета удельного контактного сопротивления  $\rho_{TE}$  выглядит следующим образом [9]:

$$\rho_{TE} = \frac{k}{qA^* T} \exp\frac{\phi_b}{kT}. \quad (7)$$

Равенство  $E_{00} = kT$  выполняется при температуре 200 К. В области этой температуры, вероятно, преобладает термополевой механизм токопереноса. И действительно, на температурной зависимости удельного контактного сопротивления, приведенной на рис. 4 в координатах термополевой эмиссии  $\rho_c = [E_{00} \operatorname{cth}(E_{00}/(kT))]^{-1}$ , хорошо выделяются два падающих участка. Первый из них, начинающийся от температуры 200 К, хорошо описывается формулой (6), полученной для термополевого механизма токопереноса, при  $\phi_b = 0,07$  эВ. Второй участок хорошо описывается зависимостью (7) для случая термоэлектронной эмиссии при  $\phi_b = 0,22$  эВ.

Предэкспоненциальные множители в формуле (6) и в экспериментальной зависимости, полученной путем аппроксимации термополевого участка рис. 4, отличаются более чем на один

порядок, что можно объяснить различием расчетной и реальной площадью токопрохождения. Иными словами, термополевой механизм обусловлен током через локальные участки с низкой высотой барьера, а при повышении температуры возрастает вероятность термоэлектронной эмиссии и все больший вклад в токоперенос вносит вся площадь.

### Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали, что при расчете удельного контактного сопротивления  $\rho_c$  в случае отрицательной корреляции между его значением и значением удельного сопротивления полупроводника  $\rho_s$  для повышения точности расчета можно вместо  $\rho_s$ , определяемого для каждого шаблона, использовать его наиболее вероятное значение.

Результаты исследования механизмов токопереноса указывают на то, что в омическом контакте с высотой барьера около 0,22 эВ в температурном диапазоне 100–200 К преобладает полевой механизм токопереноса, в диапазоне 200–360 К — термополевой по локальным участкам с энергией активации примерно 0,08 эВ.

Предложенная методика повышения точности расчета контактного сопротивления может быть использована в том числе и для ТЛМ-методов. Она может применяться как для отработки режимов формирования, так и для контроля состояния омического контакта на промежуточных операциях формирования лавинно-пролетных диодов, используя специально сформированные тестовые структуры, помещенные в разных областях полупроводниковой пластины.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Acharyya A., Banerjee J.P. Prospects of IMPATT devices phased on wide bandgap semiconductors as potential terahertz sources // Applied Nanoscience. — 2012. — Vol. 4, N 1. — P. 1–14.
2. Беляев А.Е., Басанец В.В., Болтовец Н.С. и др. Влияние перегрева  $p$ - $n$ -перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов // ФТП. — 2011. — Т. 45, № 2. — С. 256–262.
3. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. Москва: Физматлит, 2008.
4. Dieter K. Schroder. Semiconductor material and device characterization. — New York: John Wiley & Sons, 2006.
5. Bazu M., Bajenescu T. Failure Analysis: A practical guide for manufacturers of electronic components and systems. — New York: J. Wiley & Sons, 2011.
6. Belyaev A.E., Boltovets N.S., Venger E.F. et al. Physico-technological aspects of degradation of silicon microwave diodes. — Kyiv: Akadempriodyka, 2011.
7. Cox R.H., Strack H. Ohmic contacts for GaAs devices // Sol. Stat. Electron. — 1967. — Vol. 10, N 12. — P. 1213–1218.
8. Brillson L. J. Contacts to semiconductors: fundamentals and technology. — New York: Noyes Publ., 1993.
9. Simon M. Sze, Kwok K. Ng. Physics of semiconductor devices. — New York: John Wiley & Sons, 2006.
10. Padovani F.A., Stratton R. Field and thermionic-field emission in Schottky barriers // Sol. Stat. Electron. — 1966. — Vol. 9, N 7. — P. 695–707.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 18.07 2014 г.

В. В. БАСАНЕЦЬ<sup>1</sup>, В. С. СЛЕПОКУРОВ<sup>2</sup>, к. ф.-м. н. В. В. ШИНКАРЕНКО<sup>2</sup>,  
Р. Я. КУДРИК<sup>3</sup>, к. т. н. Я. Я. КУДРИК<sup>2</sup>

Україна, м. Київ, <sup>1</sup>НДІ «Оріон», <sup>2</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ;  
<sup>3</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка  
E-mail: kudryk@isp.kiev.ua

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТОМОГО ОПОРУ ОМІЧНИХ КОНТАКТІВ Au–Ti–Pd–n-Si ДЛЯ ЛАВИННО-ПРОЛІТНИХ ДІОДІВ

Досліджено питомий опір омичного контакту Au–Ti–Pd–n-Si і механізм струмопротікання в інтервалі температур 100–360 К. Запропоновано спосіб зменшення похибки визначення питомого контактного опору на основі аналізу статистичних залежностей вимірених величин. Виміряні значення питомого контактного опору знаходяться в діапазоні  $(0,9–2,0) \cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup>. На основі температурної залежності питомого контактного опору встановлено, що в омичному контакті з висотою бар'єру 0,22 еВ в температурному діапазоні 100–200 К переважає польовий механізм струмопротікання, в діапазоні 200–360 К – термопольовий з енергією активації 0,08 еВ.

Ключові слова: питомий опір, омичний контакт, лавинно-пролітний діод, термопольова емісія.

DOI: 10.15222/TKEA2015.1.33  
UDC 538.91

V. V. BASANETS<sup>1</sup>, V. S. SLEPOKUROV<sup>2</sup>,  
V. V. SHINKARENKO<sup>2</sup>, R. Ya. KUDRIK<sup>3</sup>, Ya. Ya. KUDRIK<sup>2</sup>

Ukraine, Kiev, <sup>1</sup>НИ «Орион»,  
<sup>2</sup>Institute of Semiconductor Physics V. E. Lashkaryov NASU;  
<sup>3</sup>Ivan Franko National University of Lviv  
E-mail: kudryk@isp.kiev.ua

## INVESTIGATION OF CONTACT RESISTIVITY FOR Au–Ti–Pd–n-Si OHMIC CONTACTS FOR IMPATT DIODES

Both contact resistivity of Au–Ti–Pd–n-Si ohmic contact and mechanism of current flow are studied in the 100–360 K temperature range. A method is proposed for reduction of error in determination of contact resistivity based on analysis of statistical dependences of the measured contact resistivity values (which are in the range of  $(0.9–2) \cdot 10^{-5}$  Ω·cm<sup>2</sup>). On the basis of the contact resistivity temperature dependence, it is found for an ohmic contact with barrier height of 0.22 eV that the field mechanism of current flow is predominant in the 100–200 K temperature range, while thermal-field emission with activation energy of 0.08 eV is predominant in the 200–360 K temperature range.

Keywords: contact resistivity, ohmic contact, IMPATT diode, thermal-field emission.

### REFERENCES

1. Acharyya A., Banerjee J.P. Prospects of IMPATT devices phased on wide bandgap semiconductors as potential terahertz sources. *Applied Nanoscience*, 2012, vol. 4, no 1, pp.1-14.
2. Belyaev A. E. , Basanets V. V., Boltovets N. S., Zorenko A. V., Kapitanchuk L. M. , Kladko V. P. , Konakova R. V., Kolesnik N. V. , Korostinskaya T. V., Kritskaya T. V., Kudryk Ya. Ya., Kuchuk A. V., Milenin V. V., Ataubeva A. B. Effect of p-n junction overheating on degradation of silicon high-power pulsed IMPATT diodes. *Semiconductors*, 2011, vol. 45, no 2, pp. 253-259. (in Russian)
3. Lebedev A.I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov* [Physics of semiconductor devices]. Moscow, Fizmatlit, 2008, 488 p. (in Russian)
4. Dieter K. Schroder. *Semiconductor material and device characterization*. NY, John Wiley & Sons, 2006, 779 p.

5. Bazu M., Bajenescu T. *Failure Analysis: A practical guide for manufacturers of electronic components and systems*. NY, J. Wiley & Sons, 2011, 340 p.
6. Belyaev A.E., Boltovets N.S., Venger E.F., Konakova R.V., Kudryk Ya.Ya., Milenin V.V., Milenin G.V. *Physico-technological aspects of degradation of silicon microwave diodes*. Kyiv, Akadempriodyka, 2011, 182 p.
7. Cox R.H., Strack H. *Ohmic contacts for GaAs devices*. Sol. Stat. Electron, 1967, vol. 10, no 12, pp. 1213-1218.
8. Brillson L. J. *Contacts to semiconductors: fundamentals and technology*. NY, Noyes Publ., 1993, 680 p.
9. Simon M. Sze, Kwok K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*, NY, John Wiley & Sons, 2006, 832 p.
10. Padovani F.A., Stratton R. Field and thermionic-field emission in Schottky barriers, *Sol. Stat. Electron*, 1966, vol. 9, no 7, pp. 695-707.

Д. т. н. В. В. БАРАНОВ, А. М. БОРОВИК, И. Ю. ЛОВШЕНКО,  
к. т. н. В. Р. СТЕМПИЦКИЙ, ЧАН ТУАН ЧУНГ, ИБРАГИМ ШЕЛИБАК

Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

E-mail: nil44@bsuir.by

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ

*Реализована процедура оптимизации порогового напряжения биполярного транзистора с изолированным затвором. Посредством проведения отсеивающего эксперимента выявлены наиболее значимые входные параметры. Проведены экспериментальные исследования с использованием метода поверхности откликов для определения разброса значений выходной характеристики посредством анализа в цикле Монте-Карло, а также расчета допустимых отклонений входных параметров, в наибольшей степени влияющих на пороговое напряжение.*

*Ключевые слова: биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ), технологический процесс, конструкция, оптимизация, частотные и статические характеристики, отсеивающий эксперимент.*

Среди многообразных направлений современной полупроводниковой электроники важное место занимают электронные приборы, эксплуатируемые при высоких уровнях мощности. Важным требованием для силовой электроники является минимизация потерь энергии при преобразовании и управлении, что стимулирует поиск новых конструктивных решений, материалов для таких структур, оптимизацию технологии их изготовления.

Компьютерное моделирование, проектирование и оптимизация технологических процессов формирования приборов, а также маршрута изготовления интегральной схемы позволяют значительно сократить время разработки и исследования, повысить точность расчетов, выбрать наилучшие варианты для реализации на основе строгого математического анализа.

Биполярный транзистор с изолированным затвором (**БТИЗ**, англ. isolated gate bipolar transistor, IGBT) — один из наиболее распространенных в настоящее время приборов современной силовой электроники [1, 2], сочетающий достоинства полевого МОП-транзистора (высокое входное сопротивление, низкий уровень управляющей мощности) и биполярного транзистора (низкое выходное сопротивление, низкий уровень прямого падения напряжения). К электрофизическим параметрам БТИЗ предъявляют высокие требования (высокое, до нескольких тысяч вольт, напряжение пробоя; высокие, до нескольких сотен ампер, рабочие токи; малое, до нескольких десятков наносекунд, время переключения), но их достижение возможно только при оптимизации конструкции прибора и технологических параметров его изготовления.

Важным и необходимым этапом в современном цикле проектирования и производства интегральных микросхем является проведение статистического анализа технологии/прибора/схемы/системы с целью оптимизации параметров технологического процесса изготовления и повышения выхода годных изделий. Однако, поскольку прямое статистическое моделирование технологии требует значительных вычислительных ресурсов, особую актуальность приобретает применение аппроксимационных методов. Идея заключается в том, чтобы найти эффективный способ аппроксимации результатов численного моделирования технологического процесса, позволяющий достаточно точно описать результаты как можно меньшего количества компьютерных опытов (моделирования с использованием специального программного обеспечения) в виде, например, полиномиального ряда, и затем использовать эти аппроксимационные зависимости в статистических расчетах в цикле Монте-Карло.

В последнее время при решении таких задач посредством статистического анализа результатов численного моделирования активно используется метод поверхности откликов (**МПО**, англ. response surface methodology, RSM), в рамках которого возможно эффективное использование многомерных физических моделей для статистического проектирования и оптимизации. МПО позволяет решить принципиальную проблему, связанную с большими вычислительными затратами при проведении оптимизации параметров посредством статистического анализа в цикле Монте-Карло результатов численного моделирования в совместном цикле проектирования технологии/прибора/схемы [3]. МПО достаточно экономичен при исследовании чувстви-

тельности параметров технологического процесса посредством аппроксимации сложных взаимозависимостей. Это особенно важно для тех случаев, когда отсутствуют модели, устанавливающие соотношения между рассматриваемыми параметрами. Поведение входных параметров исследуемых процессов в методе поверхности откликов рассматривается как «черный ящик», а поверхность выходных характеристик описывается в виде полинома.

Реализация МПО заключается в последовательном применении следующих процедур.

1. Определение факторов, оказывающих наибольшее влияние на выходную характеристику. Данная процедура реализуется на основе отсеивающего эксперимента согласно выбранному плану (как правило, план Плакетта – Бермана) [4].

2. Проведение серии расчетов в рамках компьютерного моделирования или натурного эксперимента согласно выбранному плану (планы первого и второго порядков – полный факторный эксперимент, Бокса – Бенкина, Хартли, ортогональный центральный композиционный план) [4, 5] для определения коэффициентов аппроксимационного полинома, адекватно описывающего зависимость между входными параметрами и исследуемой выходной характеристикой.

3. Определение разброса выходных характеристик при заданном его интервале посредством анализа в цикле Монте-Карло с использованием полученного полинома (прямая задача).

4. Вычисление допустимого диапазона значений входных технологических параметров, обеспечивающих изменение выходной характеристики внутри заданного интервала (обратная задача).

В настоящей работе представлены результаты решения прямой и обратной задачи оптимизации технологии формирования БТИЗ.

В сложных технологических процессах на выходные характеристики изготавливаемого изделия оказывает влияние достаточно большое количество технологических параметров (факторов), но лишь несколько из них являются действительно значимыми. Для выявления этих факторов проводят так называемые отсеивающие эксперименты, что является важным и необходимым этапом решения прямой задачи – определения влияния разброса значений технологических параметров на выходные характеристики изделия.

Одним из способов планирования отсеивающего эксперимента является план Плакетта – Бермана, использующего матрицы Адамара и позволяющего тестировать большое число факторов при использовании минимального количества опытов [6].

При проведении отсеивающего эксперимента прежде всего формируется список факторов, влияющих на изучаемое явление. В соответствии с планом Плакетта – Бермана все факторы варьируются на двух уровнях (максималь-

ное и минимальное значение параметра) с одинаковым разбросом значений относительно номинального. Уровни факторов в отсеивающем эксперименте выбираются так, чтобы матрица планирования обладала следующими свойствами: сумма чисел в каждом столбце равна нулю и сумма произведений элементов, относящихся к одному наблюдению, для двух любых столбцов тоже равна нулю.

Алгоритм математической обработки результатов отсеивающего эксперимента, проведенного согласно плану Плакетта – Бермана, представлен на рис. 1.

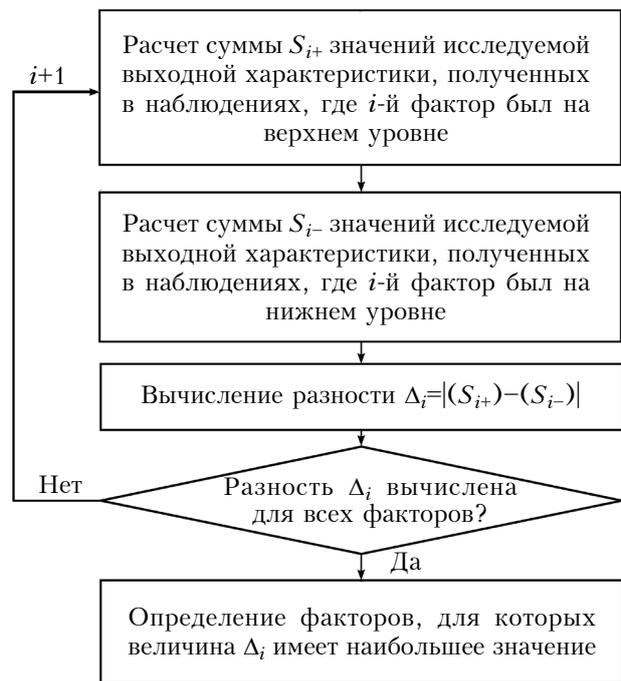


Рис. 1. Алгоритм математической обработки результатов отсеивающего эксперимента по плану Плакетта – Бермана

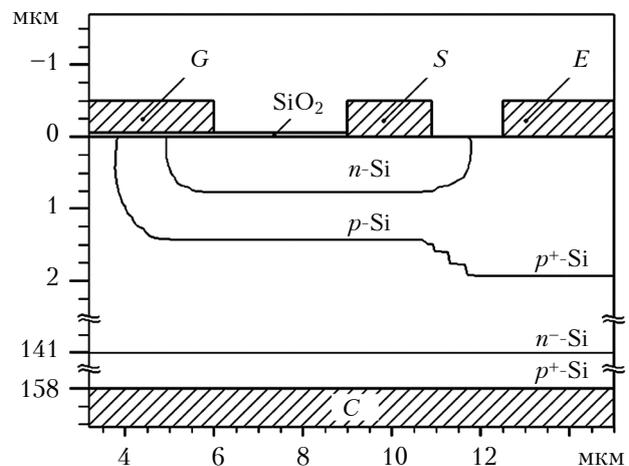


Рис. 2. Структура БТИЗ: E – эмиттер; C – коллектор; S – исток; G – затвор

В случае формирования БТИЗ наиболее значимыми конструктивно-технологическими параметрами являются те, для которых абсолютная величина разности  $\Delta_i$  между суммами значений порогового напряжения для верхнего и нижнего уровня факторов имеет наибольшее значение.

Для проведения опытов в соответствии с планом эксперимента использовались модули ATHENA и ATLAS программного комплекса компании Silvaco.

Оптимизация конструктивных и технологических параметров проводилась для структуры БТИЗ, представленной на рис. 2.

По результатам исследования влияния технологических и конструктивных факторов на пороговое напряжение  $U_{пор}$  выбраны следующие значимые параметры:

- толщина подзатворного оксида  $d_{ок}$ ;
- ширина базы  $W$ ;
- концентрация примеси в области базы  $N_б$ ;
- длина канала  $L$ ;
- концентрация примеси в области канала  $N_к$ ;
- концентрация примеси в области эмиттера  $N_э$ ;
- концентрация примеси в области истока  $N_и$ .

Построение аппроксимационной зависимости порогового напряжения БТИЗ от факторов эксперимента, определение допустимого разброса выходных характеристик посредством анализа в цикле Монте-Карло и допустимых отклонений входных параметров производится в программном комплексе Icasus [7].

Используемый для проведения отсеивающего эксперимента план Плакетта – Бермана представлен в табл. 1.

В табл. 2 представлены значения порогового напряжения БТИЗ для каждого из проведенных в соответствии с выбранным планом опытов, а также результаты вычислений, с целью анализа степени влияния каждого фактора на выходной параметр.

Результаты проведенного отсеивающего эксперимента показали, что входными конструктивно-технологическими параметрами, оказывающими наибольшее влияние на величину порогового напряжения БТИЗ, являются:

- толщина подзатворного оксида  $d_{ок}$  (далее фактор  $X_1$ );
- длина канала  $L$  ( $X_2$ );
- концентрация примеси в области канала  $N_к$  ( $X_3$ );

Таблица 1

План отсеивающего эксперимента в нормированных/номинальных значениях при исследовании влияния различных факторов на пороговое напряжение

№ опыта	$d_{ок}$ , нм	$W$ , мкм	$N_б$ , $10^{13} \text{ см}^{-3}$	$L$ , мкм	$N_к$ , $10^{16} \text{ см}^{-3}$	$N_э$ , $10^{15} \text{ см}^{-3}$	$N_и$ , $10^{18} \text{ см}^{-3}$
1	+1/60	-1/116	-1/5,29	+1/1,3	-1/8,4	+1/30,5	+1/7
2	+1/60	+1/174	-1/5,29	-1/0,9	+1/13	-1/2,03	+1/7
3	+1/60	+1/174	+1/7,93	-1/0,9	-1/8,4	+1/30,5	-1/4,7
4	-1/40	+1/174	+1/7,93	+1/1,3	-1/8,4	-1/2,03	+1/7
5	+1/60	-1/116	+1/7,93	+1/1,3	+1/13	-1/2,03	-1/4,7
6	-1/40	+1/174	-1/5,29	+1/1,3	+1/13	+1/30,5	-1/4,7
7	-1/40	-1/116	+1/7,93	-1/0,9	+1/13	+1/30,5	+1/7
8	-1/40	-1/116	-1/5,29	-1/0,9	-1/8,4	-1/2,03	-1/4,7

Таблица 2

Результаты анализа влияния различных факторов на величину порогового напряжения БТИЗ

№ опыта	Факторы							$U_{пор}$ , В
	$d_{ок}$	$W$	$N_б$	$L$	$N_к$	$N_э$	$N_и$	
1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	4,26
2	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	5,72
3	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	4,13
4	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	3,04
5	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	6,48
6	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	4,29
7	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	3,88
8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	3,03
$S_{i+}$	20,59	17,18	17,53	18,07	20,37	16,56	16,9	
$S_{i-}$	14,24	17,65	17,3	16,76	14,46	18,27	17,93	
$\Delta_i$	6,35	-0,47	0,23	1,31	5,91	-1,71	-1,03	

– концентрация примеси в области эмиттера  $N_3 (X_4)$ .

Полученные результаты полностью соответствуют данным, представленным в [8–10].

Статистический анализ и оптимизация порогового напряжения проводятся в предположении нелинейности его зависимости от факторов, что наиболее точно описывает экспериментальные данные. Полученный аппроксимационный полином имеет вид

$$Y = 11,56 - 45,61X_1 + 8,835X_2 - 2,040 \cdot 10^{-16} \cdot X_3 - 3,003 \cdot 10^{-16} X_4 + 4,938 \cdot 10^2 \cdot X_1^2 - 10,80 \cdot X_2^2 + 8,869 \cdot 10^{-16} \cdot X_3^2 + 7,382 \cdot 10^{-17} \cdot X_4^2 - 3,357 \cdot X_1X_2 + 2,543 \cdot 10^{-17} \cdot X_1X_3 - 1,767 \cdot 10^{-16} \cdot X_1X_4 + 4,479 \cdot 10^{-34} \cdot X_2X_3 + 3,211 \cdot 10^{-33} \cdot X_2X_4 + 3,004 \cdot 10^{-33} \cdot X_3X_4,$$

где  $Y$  – выходная характеристика (пороговое напряжение).

В табл. 3 представлены основные статистические характеристики полученной аппроксимационной зависимости, откуда следует, что она достаточно хорошо описывает зависимость между входными параметрами и выходной характеристикой. Это подтверждается и корреляционной зависимостью, приведенной на рис. 3.

Таблица 3

Характеристики аппроксимационной зависимости для порогового напряжения БТИЗ

Статистический параметр	Значение
Среднеквадратическое отклонение	0,1167
Коэффициент детерминации	0,9925
Скорректированный коэффициент детерминации	0,9819
Усредненная относительная ошибка, %	1,148
Максимальная относительная ошибка, %	3,927

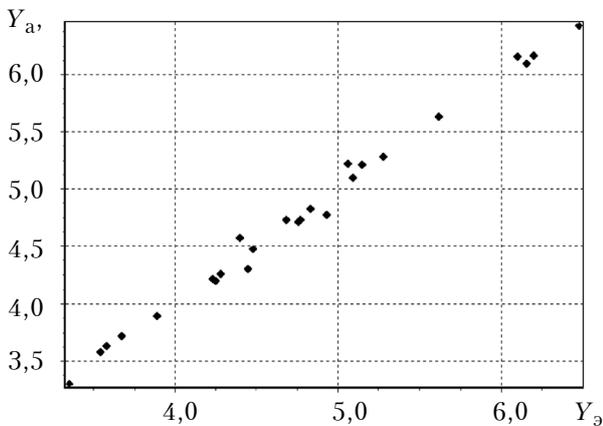


Рис. 3. Корреляция между значениями порогового напряжения БТИЗ, полученными в результате численного моделирования  $Y_3$  и аппроксимации  $Y_a$

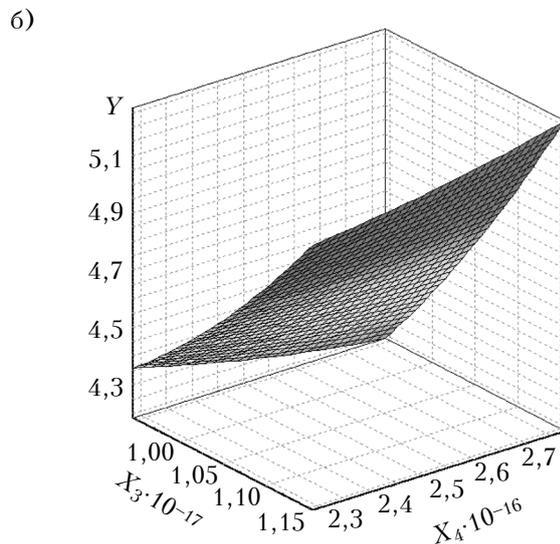
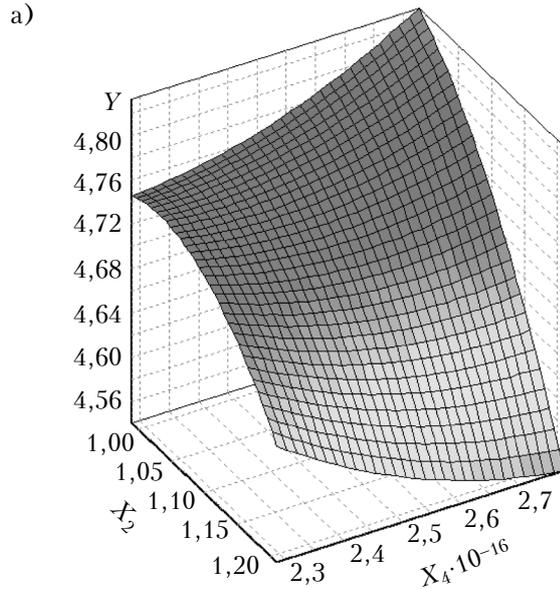


Рис. 4. Зависимости порогового напряжения  $Y$  от факторов  $X_2$  и  $X_4$  (а) и  $X_3$  и  $X_4$  (б) при номинальных значениях остальных параметров

На рис. 4 приведены типичные поверхности отклика для полученной аппроксимационной зависимости.

С использованием полученного аппроксимационного полинома проведена серия многовариантных, в цикле Монте-Карло, расчетов для определения разброса значений порогового напряжения при выбранных диапазонах отклонения входных параметров. Комбинации входных технологических параметров определялись случайным образом по нормальному закону распределения в пределах заданного диапазона их изменения (табл. 1). Статистический анализ в цикле Монте-Карло показал, что пороговое напряжение может принимать значения от 3,38 до 6,32 В.

Таблица 4  
 Результаты оптимизации порогового напряжения БТИЗ

Параметр	$d_{ox}$ , мкм	$L$ , мкм	$N_K$ , $10^{17} \text{ см}^{-3}$	$N_E$ , $10^{16} \text{ см}^{-3}$
Минимальное значение	0,047	1,053	1,020	2,405
Максимальное значение	0,062	1,082	1,095	2,613

Процедура оптимизации параметров технологического маршрута формирования БТИЗ сводилась к математической задаче определения допустимого диапазона значений значимых входных конструктивных и технологических параметров ( $X_1, \dots, X_4$ ), обеспечивающих изменение порогового напряжения БТИЗ в интервале от 4,71 до 4,81 В. Результаты оптимизации представлены в табл. 4.

**Заключение**

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на величину порогового напряжения БТИЗ, и определить интервалы их изменений для достижения значения порогового напряжения исследуемой структуры в диапазоне от 4,71 до 4,81 В, а именно:

- толщина подзатворного оксида 0,047 – 0,062 мкм;
- длина канала 1,053 – 1,082 мкм;
- концентрация примеси в области канала  $(1,020 – 1,095) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;
- концентрация примеси в области эмиттера  $(2,405 – 2,613) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Представленные результаты демонстрируют эффективность и работоспособность предлагаемой методики оптимизации, основанной на последовательном применении процедуры поиска значимых входных технологических парамет-

тров, аппроксимации результатов компьютерных экспериментов и поиска допустимых значений входных параметров, которые обеспечивают изменение выходной характеристики (порогового напряжения) в заданном диапазоне, и могут быть использованы для статистического проектирования технологии в научных исследованиях, а также в условиях опытного, серийного, а также «виртуального» производства изделий микроэлектроники.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Грехов И. Силовая полупроводниковая электроника и импульсная техника // Вестник российской академии наук. – 2008. – №2. – С. 106 – 115.
2. Флоренцев С. Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники // СТА. – 2004. – №2. – С. 20 – 30.
3. Khuri A.I., Mukhopadhyay S. Response surface methodology // Wiley Interdisciplinary Reviews – Computation Statistics. – 2010. – Vol. 2, N2. – P. 128 – 149.
4. Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента. – Минск: Изд-во БГУ, 1982.
5. Архипов В.А., Березиков А.П. Основы теории инженерно-физического эксперимента: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008.
6. Hartman, K., Lezki E., Schafer W. Statistische Versuchsplanung und -auswertung in der Stoffwirtschaft. – Leipzig: VEB Deutscher Verlag fur Grundstoffindustrie, 1974.
7. Nelayev V., Stempitsky V., Kovalevsky A. Program package for statistical analysis and optimization of IC technology // Proc. of the Int. Conf. MIXED 2004. – Szczecin, Poland. – 2004. – P. 242 – 246.
8. Khanna V. K. The insulated gate bipolar transistor IGBT: Theory and design. – New York: Wiley-IEEE Press, 2003. 648 p.
9. Michel M. Leistungselektronik. – Berlin: Springer, 2011.
10. Dodge J., Hess J. IGBT tutorial // Advanced Power Technology APT0201 Rev. B. – 2002.

*Дата поступления рукописи в редакцию 12.11 2014 г.*

*В. В. БАРАНОВ, А. М. БОРОВИК, І. Ю. ЛОВШЕНКО, В. С. СТЕМПИЦЬКИЙ, ЧАН ТУАН ЧУНГ, ІБРАГІМ ШЕЛІБАК*

Республіка Білорусь, м. Мінськ, Білоруський державний університет інформатики і радіоелектроніки  
 E-mail: nil44@bsuir.by

**СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ І ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА З ІЗОЛЬОВАНИМ ЗАТВОРОМ**

*Реалізовано процедуру оптимізації граничної напруги біполярного транзистора з ізольованим затвором. За допомогою експерименту, що відсіває, виявлено вхідні параметри, які найбільш суттєво впливають на вихідну величину (граничну напругу). Проведено експериментальні дослідження з використанням методу поверхні відгуків для визначення розкиду вихідних характеристик за допомогою аналізу в циклі Монте-Карло, а також розрахунку допустимих відхилень вхідних параметрів, що впливають на порогову напругу в найбільшій мірі.*

*Ключові слова: технологічний процес виготовлення біполярного транзистора з ізольованим затвором (БТИЗ), конструкція, оптимізація, частотні і статичні характеристики, експеримент, що відсіває.*

Republic of Belarus, Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

E-mail: nil44@bsuir.by

STATISTICAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION  
OF IGBT MANUFACTURING FLOW

The use of computer simulation, design and optimization of power electronic devices formation technological processes can significantly reduce development time, improve the accuracy of calculations, choose the best options for implementation based on strict mathematical analysis. One of the most common power electronic devices is isolated gate bipolar transistor (IGBT), which combines the advantages of MOSFET and bipolar transistor. The achievement of high requirements for these devices is only possible by optimizing device design and manufacturing process parameters. Therefore important and necessary step in the modern cycle of IC design and manufacturing is to carry out the statistical analysis. Procedure of the IGBT threshold voltage optimization was realized. Through screening experiments according to the Plackett-Burman design the most important input parameters (factors) that have the greatest impact on the output characteristic was detected. The coefficients of the approximation polynomial adequately describing the relationship between the input parameters and investigated output characteristics were determined. Using the calculated approximation polynomial, a series of multiple, in a cycle of Monte Carlo, calculations to determine the spread of threshold voltage values at selected ranges of input parameters deviation were carried out. Combinations of input process parameters values were determined randomly by a normal distribution within a given range of changes. The procedure of IGBT process parameters optimization consist a mathematical problem of determining the value range of the input significant structural and technological parameters providing the change of the IGBT threshold voltage in a given interval. The presented results demonstrate the effectiveness of the proposed optimization techniques.

**Keywords:** IGBT manufacturing process, optimization, IGBT frequency and static characteristics, screening experiments.

## REFERENCES

1. Grekhov I. [Power semiconductor electronics and impulse technique] *Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk*, 2008, no 2, pp. 106-115. (in Russian)
2. Florentsev S. [Current state and forecast of power electronic devices development]. *CTA (Contemporary Technologies in Automation)*, 2004, no 2, pp. 20-30. (in Russian)
3. Khuri A.I., Mukhopadhyay S. Response surface methodology. *Wiley Interdisciplinary Reviews – Computation Statistics*, 2010, vol. 2, no 2, pp. 128-149.
4. Krasovsky G.I., Filaretov G.F. *Experiment planning*, Minsk, Publishing house BGU, 1982, 302 p. (in Russian)
5. Arhipov V. A., Berezikov A. P. *Osnovy teorii inzhenerno-fizicheskogo eksperimenta* [Fundamentals of engineering and physics experiment theory]. Tomsk, Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2008, 206 p. (in Russian)
6. Hartman, K., Lezki E., Schafer W. *Statistische Versuchsplanung und -auswertung in der Stoffwirtschaft*. Leipzig, VEB Deutscher Verlag fur Grundstoffindustrie, 1974, 439 p.
7. Nelayev V., Stempitsky V., Kovalevsky A. Program package for statistical analysis and optimization of IC technology. *Proc. of the Int. Conf. MIXED 2004*, Szczecin, Poland, 2004, pp. 242-246.
8. Khanna V. K. *The insulated gate bipolar transistor IGBT: Theory and design*. Wiley-IEEE Press, 2003, 648 p.
9. Michel M. *Leistungselektronik*. Berlin, Springer, 2011, 327 p.
10. Dodge J., Hess J. IGBT tutorial, *Advanced Power Technology APT0201 Rev. B*, 2002, 15 p.

К. т. н. В. П. ЗАЙКОВ<sup>1</sup>, д. т. н. В. И. МЕЩЕРЯКОВ<sup>2</sup>,  
к. т. н. А. А. ГНАТОВСКАЯ<sup>2</sup>, Ю. И. ЖУРАВЛЕВ<sup>3</sup>

Украина, г. Одесса, <sup>1</sup>НИИ «Шторм», <sup>2</sup>Одесский государственный экологический университет,  
<sup>3</sup>Одесская национальная морская академия

E-mail: gradan@ua.fm

## ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ. ЧАСТЬ I: ОДНОКАСКАДНЫЕ ТЭУ

*Рассмотрено влияние термоэлектрической эффективности исходных материалов модулей на показатели надежности термоэлектрического охлаждающего устройства (ТЭУ), функционирующего в граничных токовых режимах ( $Q_{0max}$  и  $\lambda_{min}$ ) при различных значениях перепада температуры. Показано, что с ростом термоэлектрической эффективности материалов в модуле уменьшается интенсивность отказов ТЭУ, а следовательно, увеличивается вероятность его безотказной работы.*

*Ключевые слова: термоэлектрическое устройство, надежность, интенсивность отказов, эффективность, температура, рабочий ток.*

Одним из основных направлений развития и совершенствования современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является миниатюризация элементов твердотельной электроники, что приводит к увеличению удельных тепловых потоков и снижению надежности ее функционирования. Одним из наиболее приемлемых способов обеспечения теплового режима элементов и составных частей РЭА является термоэлектрический. Основное его преимущество перед другими способами охлаждения заключается в высокой надежности, малых габаритных размерах, простоте управления и быстродействии. Эти преимущества по своей сути являются следствием твердотельной природы таких охладителей, т. е. отсутствием движущихся частей, перекачиваемых жидкостей или газов. В настоящее время термоэлектрический способ охлаждения широко применяется в радиоэлектронике, квантовой оптике, СВЧ-технике, информационных системах и т. д.

К одному из основных требований, предъявляемых при проектировании современной РЭА, следует отнести обеспечение высокого уровня ее надежности, что напрямую связано с повышением надежности составляющих ее элементов, в том числе и термоэлектрических охлаждающих устройств (ТЭУ). Вопросам оценки и прогнозирования показателей надежности ТЭУ посвящен ряд работ [1–7], но они в основном относятся к конструктивному способу повышения показателей надежности (выбор режима работы). Что же касается параметрического метода повышения надежности, такие данные в литературе отсутствуют.

Одним из возможных направлений параметрического метода повышения надежности ТЭУ является улучшение качества исходных термоэлектрических материалов и, в первую очередь,

их эффективности. Одной из основных характеристик ТЭУ традиционно считается максимальный перепад температуры  $\Delta T_{max}$ , который определяется эффективностью  $Z_M$  исходных материалов и температурой теплопоглощающего спая  $T_0$  [8]:

$$\Delta T_{max} = 0,5Z_M T_0^2. \quad (1)$$

Целью настоящей работы является анализ влияния термоэлектрической эффективности исходных материалов модулей однокаскадных ТЭУ на такие показатели их надежности, как интенсивность отказов и вероятность безотказной работы при  $T = 300$  К.

Исследования проводились для следующих усредненных значений термоэлектрической эффективности исходных материалов  $Z_M$  при различных значениях рабочего перепада температуры  $\Delta T$ :

$Z_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $\Delta T = 65$  К (для условий серийного производства);

$Z_M = 2,6 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $\Delta T = 68$  К (для лабораторных условий);

$Z_M = 2,75 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $\Delta T = 72$  К (максимальное значение).

С ростом термоэлектрической эффективности исходных материалов увеличивается максимальный перепад температуры, а следовательно, уменьшается относительный перепад температуры, увеличивается холодопроизводительность одного термоэлемента, что позволяет уменьшить количество термоэлементов. Все это приводит к улучшению показателей надежности — уменьшению интенсивности отказов  $\lambda$  и увеличению вероятности безотказной работы  $P$ .

Для определения  $\lambda$  и  $P$  воспользуемся моделью взаимосвязи показателей надежности и основных значимых параметров однокаскадного ТЭУ [4, с. 22–25].

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Относительную величину интенсивности отказов можно записать в виде

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{n B^2 (\theta + C) \left( B + \frac{\Delta T_{\max} \theta}{T_0} \right)^2}{\left( 1 + \frac{\Delta T_{\max} \theta}{T_0} \right)^2} K_T, \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  – номинальная интенсивность отказов (1/ч);  
 $B$  – относительный рабочий ток,  $B=I/I_{\max}$ ;  
 $I$  – рабочий ток (А);  
 $I_{\max}$  – максимальный рабочий ток (А),  $I_{\max} = eT_0/R$ ;  
 $e, R$  – соответственно, коэффициент термоэдс (В/К) и электрическое сопротивление ветви термоэлемента (Ом);  
 $\theta$  – относительный перепад температуры,  
 $\theta = \Delta T / \Delta T_{\max} = (T - T_0) / \Delta T_{\max}$ ;  
 $C$  – относительная тепловая нагрузка,  
 $C = Q_0 / (n I_{\max}^2 R)$   
 $n$  – количество термоэлементов;  
 $Q_0$  – тепловая нагрузка (Вт);  
 $K_T$  – коэффициент значимости, учитывающий влияние пониженных температур.

Вероятность безотказной работы ТЭУ можно записать в виде:

$$P = \exp(-\lambda t), \quad (3)$$

где  $t$  – назначенный ресурс.

В таблице приведены результаты расчетов основных значимых параметров показателей надежности однокаскадных ТЭУ в режиме максимальной холодопроизводительности ( $Q_{0\max}$ ) и в режиме минимальной интенсивности отказов ( $\lambda_{\min}$ ) при следующих исходных данных:  $Q_0 = 2,0$  Вт;  $\Delta T = 40, 50, 60$  К; отношение длины термоэлемента к площади его сечения  $l/S = 10$  см<sup>-1</sup>;  $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$  1/ч;  $t = 10^4$  ч. (Выбор режимов  $Q_{0\max}$  и  $\lambda_{\min}$  обусловлен их максимальным отличием по  $\lambda$ .)

Анализ расчетных данных показал, что для различных значений заданного перепада температуры  $\Delta T$  рост термоэлектрической эффективности в интервале  $(2,4 - 2,75) \cdot 10^{-3}$  1/К при  $T = 300$  К приводит к следующему:

- увеличивается в среднем на 18% максимальный перепад температуры (**рис. 1**);
- увеличивается до 30% максимальный рабочий ток;

*Основные значимые параметры показателей надежности однокаскадных ТЭУ*

Режим работы	$I, A$	$\theta$	$B$	$E$	$n$	$\lambda, 10^{-8} 1/ч$	$P$
<b><math>\Delta T=40 K</math></b>							
$Z_M=2,4 \cdot 10^{-3} 1/K$							
$Q_{0\max}$	4,92	0,500	1,00	0,22	15,9	48,70	0,9951
$\lambda_{\min}$	2,00		0,41	0,33	52,3	4,18	0,9996
$Z_M=2,6 \cdot 10^{-3} 1/K$							
$Q_{0\max}$	6,00	0,455	1,00	0,24	11,6	35,50	0,9964
$\lambda_{\min}$	2,20		0,37	0,38	42,8	2,24	0,9998
$Z_M=2,75 \cdot 10^{-3} 1/K$							
$Q_{0\max}$	6,55	0,430	1,00	0,25	9,80	30,00	0,9970
$\lambda_{\min}$	2,30		0,35	0,42	37,9	1,58	0,9998
<b><math>\Delta T=50 K</math></b>							
$Z_M=2,4 \cdot 10^{-3} 1/K$							
$Q_{0\max}$	4,70	0,70	1,00	0,125	29,6	91,30	0,9909
$\lambda_{\min}$	2,82		0,60	0,145	63,4	26,35	0,9974
$Z_M=2,6 \cdot 10^{-3} 1/K$							
$Q_{0\max}$	5,50	0,63	1,00	0,150	19,6	60,45	0,9940
$\lambda_{\min}$	2,94		0,54	0,200	47,2	12,30	0,9988
$Z_M=2,75 \cdot 10^{-3} 1/K$							
$Q_{0\max}$	6,05	0,59	1,00	0,170	15,7	48,40	0,9952
$\lambda_{\min}$	3,00		0,50	0,230	40,3	7,92	0,9992
<b><math>\Delta T=60 K</math></b>							
$Z_M=2,4 \cdot 10^{-3} 1/K$							
$Q_{0\max}$	4,56	0,91	1,00	0,034	106,9	332,0	0,9673
$\lambda_{\min}$	3,80		0,83	0,036	157,7	244,5	0,9758
$Z_M=2,6 \cdot 10^{-3} 1/K$							
$Q_{0\max}$	5,43	0,82	1,00	0,072	43,7	135,6	0,9865
$\lambda_{\min}$	4,00		0,73	0,075	73,5	69,3	0,9931
$Z_M=2,75 \cdot 10^{-3} 1/K$							
$Q_{0\max}$	5,87	0,77	1,00	0,092	30,6	95,0	0,9905
$\lambda_{\min}$	4,00		0,68	0,100	55,1	39,3	0,9961

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

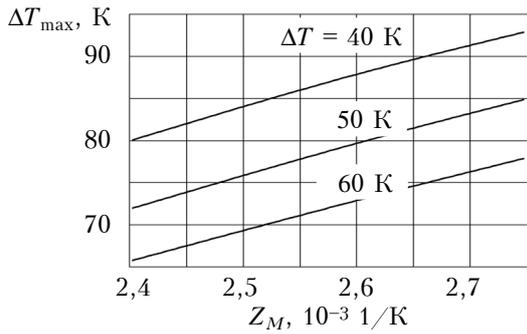


Рис. 1. Зависимость максимального перепада температуры от  $Z_M$  модуля однокаскадного ТЭУ при  $T = 300$  К и различных значениях  $\Delta T$

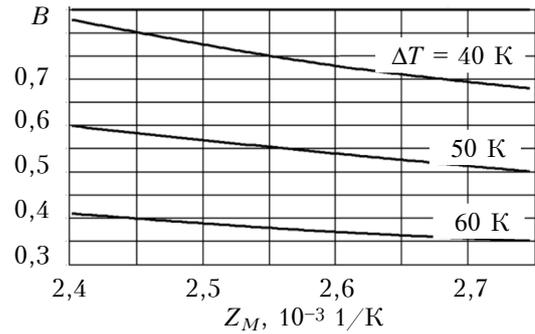


Рис. 2. Зависимость относительного рабочего тока однокаскадного ТЭУ от  $Z_M$  модуля для режима  $\lambda_{\min}$  при  $T = 300$  К и различных значениях  $\Delta T$

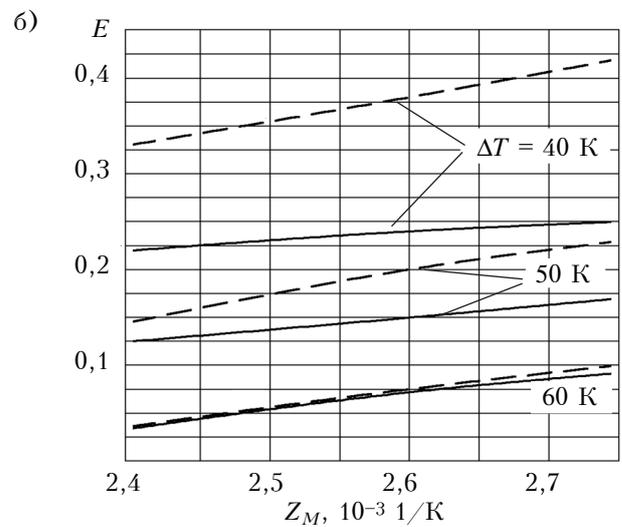
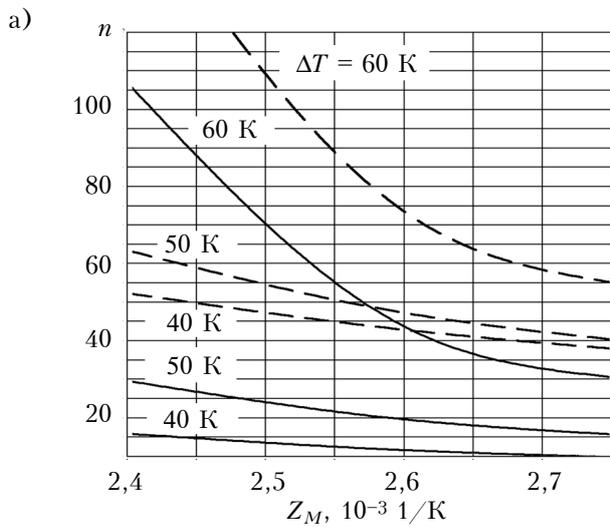


Рис. 3. Зависимость количества термоэлементов (а) и холодильного коэффициента  $E$  (б) от  $Z_M$  модуля однокаскадного ТЭУ для режимов  $Q_{0\max}$  (сплошные линии) и  $\lambda_{\min}$  (пунктир) при  $T = 300$  К и различных значениях  $\Delta T$

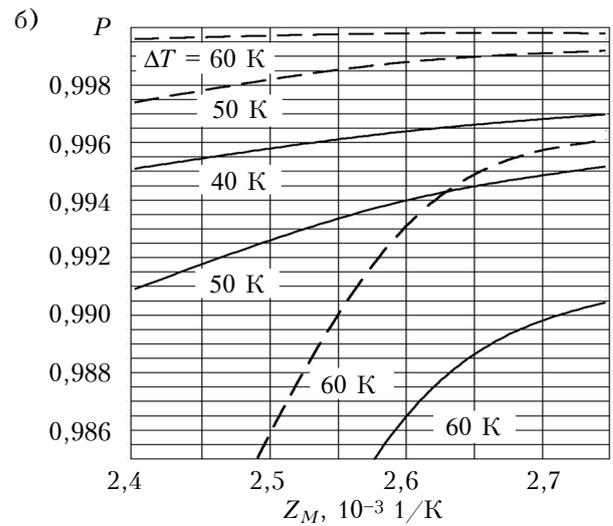
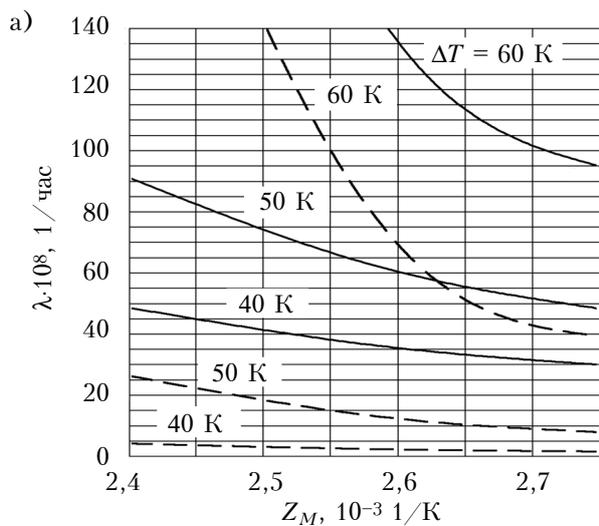


Рис. 4. Зависимость интенсивности отказов (а) и вероятности безотказной работы (б) от  $Z_M$  модуля однокаскадного ТЭУ для режимов  $Q_{0\max}$  (сплошные линии) и  $\lambda_{\min}$  (пунктир) при  $T = 300$  К и различных значениях  $\Delta T$

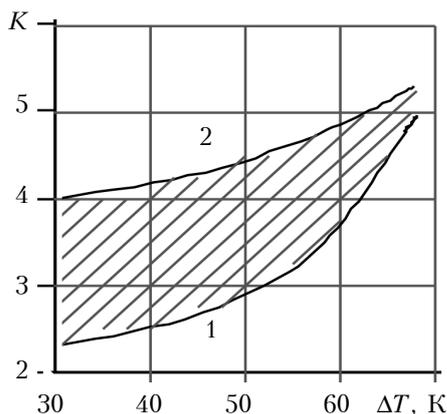


Рис. 5. Зависимость коэффициента  $K = \frac{\Delta\lambda/\lambda}{\Delta Z/Z}$  от общего перепада температуры  $\Delta T$  для режимов  $Q_{0max}$  (1) и  $\lambda_{min}$  (2) при  $T=300$  К,  $l/S=10$  см<sup>-1</sup>

- уменьшается до 15% относительный перепад температуры;
- уменьшается до 15% относительный рабочий ток в режиме  $\lambda_{min}$  (рис. 2; в режиме  $Q_{0max}$   $B=1,0=const$ );
- уменьшается количество термоэлементов (в режиме  $Q_{0max}$  – до 40% при значениях  $\Delta T$ , равных 40 и 50 К, и резко уменьшается при  $\Delta T = 60$  К; рис. 3, а);
- увеличивается до 30% холодильный коэффициент  $E$  (рис. 3, б);
- уменьшается интенсивность отказов (в среднем на 50% в режиме  $Q_{0max}$  и на 70% в режиме  $\lambda_{min}$ , причем при увеличении  $\Delta T$  до 60 К происходит резкое снижение  $\lambda$ ; рис. 4, а)
- увеличивается вероятность безотказной работы (с ростом  $\Delta T$  наблюдается резкий рост  $P$ ; рис. 4, б).

На рис. 5 приведена зависимость от общего перепада температуры коэффициента  $K$ , отражающего взаимосвязь относительных изменений интенсивности отказов  $\Delta\lambda/\lambda$  и термоэлектрической эффективности  $\Delta Z_M/Z_M$ .

Следует отметить, что на рис. 5 заштрихована область, образованная кривыми для экстремальных режимов  $Q_{0max}$  и  $\lambda_{min}$ , в которой лежат зависимости для всех промежуточных режимов.

Анализ полученных данных показывает, что рост термоэлектрической эффективности исхо-

дных материалов в модуле приводит к уменьшению интенсивности отказов  $\lambda$  с ростом перепада температуры  $\Delta T$ . Например, увеличение  $Z_M$  на 1% позволяет уменьшить интенсивность отказов на 2,6–4,3% в режиме  $Q_{0max}$  и на 4,2–5,0% в режиме  $\lambda_{min}$  при изменении  $\Delta T$  в диапазоне от 40 до 60 К.

**Выводы**

Проведенные исследования показали, что увеличение термоэлектрической эффективности исходных материалов позволяет улучшить показатели надежности ТЭУ – уменьшить интенсивность отказов  $\lambda$  и увеличить вероятность безотказной работы  $P$  для заданных параметров (перепад температуры, тепловая нагрузка и режим работы). Совмещение конструктивных методов (выбор режима работы  $\lambda_{min}$ ) с параметрическими позволяет построить ТЭУ повышенной надежности.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Зайков В.П., Моисеев В.Ф. Влияние режима работы термоэлектрического устройства на его надежность // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2001. – № 4–5. – С. 30–32.
2. Зайков В.П., Киншова Л.А., Моисеев В.Ф. и др. Выбор режима термоэлектрического охлаждающего устройства, обеспечивающего минимальную интенсивность отказов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008. – № 2. – С. 45–47.
3. Зайков В.П., Киншова Л.А., Марченко В.И. Влияние тепловой нагрузки на показатели надежности термоэлектрического устройства // Тепловые режимы и охлаждение РЭА. – 2003. – Вып. 1. – С. 56–62.
4. Зайков В.П., Киншова Л.А., Моисеев В.Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. – Одесса: Политехпериодика, 2009.
5. Лау П.С., Нэйджи М.Дж. Оценка надежности термоэлектрических холодильников // Термическое оборудование. Технология. – 2004. – Вып. 1. – С. 43–46.
6. Iversen B.V., A Palmqvist E., Cox D.E. et al. Why are clathrates good candidates for thermoelectric materials // Solid State Chem. – 2000. – Vol. 149. – P. 455-458.
7. Riffat S.R., Xiaoli M. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems // International journal of energy research. – 2004. – Vol. 28. – P. 78–85.
8. Коленко Е.А., Стильбанс Л.С. Термоэлектрические холодильники // Полупроводники в науке и технике. – Изд-во АН СССР, 1958. – С. 249–250.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 11.12.2013 г.

В. П. ЗАЙКОВ, В. І. МЕЩЕРЯКОВ, Г. А. ГНАТОВСЬКА, Ю. І. ЖУРАВЛЬОВ  
Україна, м. Одеса, <sup>1</sup>НДІ «Шторм», <sup>2</sup>Одеський державний екологічний університет,  
<sup>3</sup>Одеська національна морська академія  
E-mail: gradan@ua.fm

**ВПЛИВ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРВИННИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ. ЧАСТИНА І: ОДНОКАСКАДНІ ТЕП**

Розглянуто вплив термоелектричної ефективності первинних матеріалів у модулі на показники надійності термоелектричного охолоджувального пристрою (ТЕП), який функціонує в умовах гранич-

них токових режимів ( $Q_{0max}$  и  $\lambda_{min}$ ) при різних перепадах температури. Показано, що із зростанням термоелектричної ефективності матеріалів в модулі зменшується інтенсивність відмов ТЕП, а відповідно, зростає вірогідність його безвідмовної роботи.

Ключові слова: термоелектричний пристрій, надійність, інтенсивність відмов, ефективність, температура, робочий струм.

DOI: 10.15222/TKEA2015.1.44  
UDC 621.317: 621.3.08

V. P. ZAIKOV<sup>1</sup>, V. I. MESHCHERYAKOV<sup>2</sup>,  
A. A. GNATOVSKAYA<sup>2</sup>, Yu. I. ZHURAVLEV<sup>3</sup>

Odessa, Ukraine, <sup>1</sup>Research Institute «Storm»,  
<sup>2</sup>Odessa State Environmental University,  
<sup>3</sup>Odessa National Maritime Academy  
E-mail: gradan@ua.fm

## INFLUENCE OF THE EFFECTIVENESS OF RAW MATERIALS ON THE RELIABILITY OF THERMOELECTRIC COOLING DEVICES. PART I: SINGLE-STAGE TEDs

*Increase of the reliability of information systems depends on the reliability improvement of their component elements, including cooling devices, providing efficiency of thermally loaded components. Thermoelectric devices based on the Peltier effect have significant advantages compared with air and liquid systems for thermal modes of the radio-electronic equipment. This happens due to the absence of moving parts, which account for the failure rate.*

*The article presents research results on how thermoelectric efficiency modules affect the failure rate and the probability of non-failure operation in the range of working temperature of thermoelectric coolers. The authors investigate a model of relative failure rate and the probability of failure-free operation single-stage thermoelectric devices depending on the main relevant parameters: the operating current flowing through the thermocouple and resistance, temperature changes, the magnitude of the heat load and the number of elements in the module.*

*It is shown that the increase in the thermoelectric efficiency of the primary material for a variety of thermocouple temperature changes causes the following: maximum temperature difference increases by 18%; the number of elements in the module decreases; cooling coefficient increases; failure rate reduces and the probability of non-failure operation of thermoelectric cooling device increases. Material efficiency increase by 1% allows reducing failure rate by 2,6–4,3% in maximum refrigeration capacity mode and by 4,2–5,0% in minimal failure rate mode when temperature difference changes in the range of 40–60 K.*

*Thus, the increase in the thermoelectric efficiency of initial materials of thermocouples can significantly reduce the failure rate and increase the probability of failure of thermoelectric coolers depending on the temperature difference and the current operating mode.*

*Key words: thermoelectric device, reliability, failure rate, temperature, operating current*

### REFERENCES

1. Zaikov V. P., Moiseev V. F. [Effect of operating a thermoelectric device on its reliability] *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2001, no 4-5, pp. 30-32. (in Russian)
2. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F., Efremov V. I., Melnik Yu. V. [Choice of operation mode of the thermoelectrical cooling device, ensuring the minimal failure rate]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2008, no 2, pp. 45-47. (in Russian)
3. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Marchenko V.I. [Effect of the heat load on reliability parameters of the thermoelectric device]. *Teplovye rezhimy i okhlazhdenie REA*, 2003, iss. 1, pp. 56-62. (in Russian)
4. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F. *Prognozirovaniye pokazatelei nadezhnosti termoelektricheskikh okhlazhdayushchikh ustroystv. Kniga 1. Odnokaskadnye ustroystva* [Forecasting reliability performance of thermoelectric cooling devices. Book 1. Single stage device]. Odessa, Politehperiodika, 2009, 118 p. (in Russian)
5. Lau P.S., Neiji M.J. [Evaluation of reliability of thermoelectric coolers] *Termicheskoe oborudovanie. Tekhnologiya*, 2004, iss. 1, pp. 43-46. (in Russian)
6. Iversen B.B., Palmqvist E., Cox D.E., Nolas G.S., Stucky G.D., Blake N.P., Metiu H. Why are clathrates good candidates for thermoelectric materials. *Solid State Chem.*, 2000, vol. 149, pp. 455-458.
7. Riffat S.R., Xiaoli M. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems. *International journal of energy research*, 2004, vol. 28, pp. 78-85.
8. Kolenko E.A., Stil'bans L.S. [Thermoelectric coolers]. *Poluprovodniki v nauke i tekhnike. Izd-vo AN SSSR*, 1958, pp. 249-250. (in Russian)

A. S. TURTSEVICH, Dr. Sci. (Techn), O. Y. NALIVAICO

Republic of Belarus, Minsk, JSC INTEGRAL, Management Company of INTEGRAL Holding

E-mail: Aturtsevich@integral.by, onalivaiko@integral.by

## DEPOSITION OF BOROPHOSPHOSILICATE GLASS FILMS USING THE TEOS–DIMETHYLPHOSPHITE–TRIMETHYLBORATE SYSTEM

*Modernization of horizontal low pressure deposition system has been performed. The liquid source delivery system using the bubblers has been developed. The PSG and BPSG film deposition processes and film properties using TEOS-Dimethylphosphite-TEB system have been studied. It is shown that the use of dimethylphosphite allows varying the phosphorus concentration in the wide range. It is found that the optimal range of the total boron and phosphorus concentration ensuring the acceptable topology planarity and resistance to defect formation during storage is  $8.7 \pm 0.3$  wt% when the phosphorus concentration is 3.0–3.8 wt%. It is found that at use of the TEOS-DMP-TEB system the depletion of the phosphorus concentration along reaction zone does not occur, and the total dopant concentration is practically constant. At the same time the deposition rate of BPSG films is 9.0–10.0 nm/min and the good film thickness uniformity are ensured. The as-deposited films have “mirror-like surface” that is proof of minimal surface roughness. The BPSG films with optimal composition are characterized by the reduced reaction capability against atmospheric moisture.*

*Keywords:* borophosphatesilicate glass, deposition, topological relief planarity.

With shrinking device geometries the task of planarizing surface topography becomes more important [1]. Phosphosilicate glass (PSG) and borophosphosilicate glass (BPSG) are widely used for this purpose [2]. These binary and ternary glass films have an intrinsic flow property due to the temperature dependence of glass viscosity. BPSG films are also more attractive for use than PSG in contact reflow process (second thermal reflow), which is used for rounding of sharp contact edges to improve the step coverage by subsequent metal film. PSG and BPSG films are mostly produced by oxidation of silane [3] or pyrolytic decomposition of tetraethylorthosilicate [4, 5] with the addition of boron and phosphorus dopants during deposition.

The main disadvantages of silane-based processes are using toxic reagents, difficulty of process control, relatively high defect density of deposited films because the oxidation of silane (and phosphine) proceeds by the free-radical chain mechanism with intermediates being formed in the gas phase [6, 7]. Furthermore, silane processes take place at a relatively low temperature and cannot provide good step coverage. Silane based BPSG films need high doping to provide flowability, but this also leads to poor film stability in storage. Using organosilicon compounds (TEOS) allows to obtain the high-quality films [8], to reduce noxious emissions [9], and to improve step coverage

[10] and narrow gap filling [5, 11]. Nonetheless, moisture absorption and defect formation in highly doped glass films are still big challenges for these solutions.

**Table 1** summarizes physical and chemical properties of common source materials for the deposition of PSG and BPSG films. With the TEOS–trimethylphosphate(TMPO)–O<sub>2</sub> and TEOS–TMPO–trimethylborate(TMB)–O<sub>2</sub> systems, films of over 3 wt% P are relatively difficult to produce because TMPO has a low vapor pressure [13, 14]. Furthermore, the P concentration of BPSG films is known to be strongly dependent on the temperature of deposition when this involves TMPO [15].

**Fig. 1** depicts the dependence of the B and P concentrations in BPSG films on the deposition temperature in the case of the TEOS–trimethylphosphite(TMPite)–TMB–O<sub>2</sub> system. Notice that the P concentration falls from 4.2 to 1 wt% at a rate of about 0.06 wt%/deg as the deposition temperature is raised from 675 to 725°C, while the B concentration remains fairly constant at 6.2–6.4 wt%. The authors of [13] have shown that a flow angle  $\alpha$  less than 45° is achieved when the sum of the B and P concentrations exceeds 8.7 wt%, provided that they are greater than 5.65 and 1.4 wt%, respectively. On the other hand, boron-rich films are very hygroscopic and unstable in storage [16–19] and are not adequate in gettering alkali

Table 1

*Physical and chemical properties of common source materials for the deposition of PSG and BPSG films*

Material	Abbreviation	Chemical formula	Relative molecular mass	Physical state	Melting point, °C	Boiling point, °C	Density, g/cm <sup>3</sup> (gas), g/ml (liquid)	Refractive index	Threshold limit value, mg/m <sup>3</sup>
Monosilane	—	SiH <sub>4</sub>	32.12	gas	-185	-112	1.44	—	1.0
Tetraethylorthosilicate	TEOS	(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O) <sub>4</sub> Si	208.34	liquid	-82.5	166.5	0.968 <sup>25°C</sup>	1.3837	20
Dimethyldichloro-silane	DMDCS	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> Si	129.06	liquid	-36	70.3	1.064 <sup>20°C</sup>	1.4055	1.0
Phosphine	—	PH <sub>3</sub>	34.0	gas	-133.8	-87.4	1.53	—	0.1
Trimethylphosphate	TMP, TMPO	(CH <sub>3</sub> O) <sub>3</sub> PO	140.07	liquid	-46	193–197	1.214 <sup>25°C</sup>	1.4089	2.69
Trimethylphosphite	TMPite	(CH <sub>3</sub> O) <sub>3</sub> P	124	liquid	-78	111	1.052	—	—
Dimethylphosphite [12]	DMP	(CH <sub>3</sub> O) <sub>2</sub> P(O)H	110.04	liquid	—	170.5	1.1944	1.4036	—
Phosphorus trichloride	—	PCl <sub>3</sub>	137.33	liquid	-90.3	75.1	1.557	1.516	0.2
Phosphorus oxychloride	—	POCl <sub>3</sub>	153.33	liquid	—	105.8	1.675	1.460	0.05
Diborane	—	B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	27.67	gas	-165.5	-92.5	1.24	—	0.1
Trimethylborate	TMB	(CH <sub>3</sub> O) <sub>3</sub> B	103.91	liquid	-34	68-69	0.915 <sup>20°C</sup>	—	—
Triethylborate	TEB	(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O) <sub>3</sub> B	145.99	liquid	-84.5	117.4	0.858	—	—
Tripolyborate	TPB	(C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> O) <sub>3</sub> B	188.08	liquid	—	175–178	0.862 <sup>5°C</sup>	1.394	—
Boron trichloride	—	BCl <sub>3</sub>	117.17	liquid	-107	12.4	1.434	1.428	—

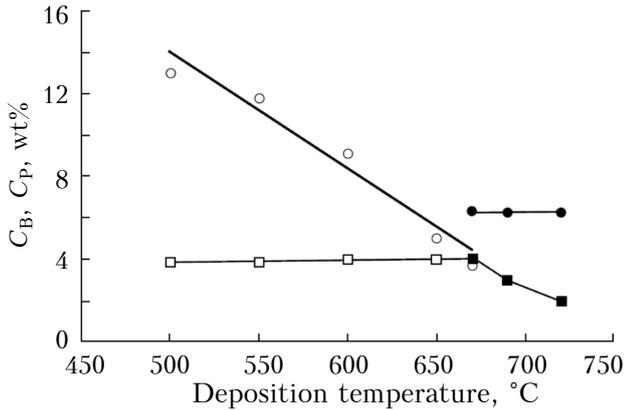


Fig. 1. Previously reported boron ( $C_B$ ) and phosphorus ( $C_P$ ) concentrations in BPSG films vs. deposition temperature in the case of the TEOS-TMPite-TMB- $O_2$  system  
 □ – boron [13]; ● – boron [15]; ○ – phosphorus [13];  
 ■ – phosphorus [15]

metals (ions). Moreover, using the boron-rich BPSG films can cause the contact-to-contact short failure in ultra large-scale integration by wiggling contact profile [20].

Furthermore, with the TEOS-TMPO-TMB system, the considerable depletion of phosphorus

along the deposition zone makes it difficult to strike a balance between the deposition rate, the amount and the uniformity of P concentration, and the thickness uniformity.

In view of the above, we find it worthwhile to identify alternative systems of source materials for the deposition of PSG and BPSG films that would allow a higher degree of control over the B and P concentrations and better thickness reproducibility in deposition, and would provide films more stable in storage. The TEOS-DMP, TEOS-DMP-TEB, and TEOS-DMP-TMB systems are of particular interest in these respects. This paper presents an experimental investigation into the deposition kinetics of PSG and BPSG films from the TEOS-DMP-TEB(TMB) reactant system, and into the properties of the films.

**Experiment**

The experiments were performed using 4 inch B-doped, <100> oriented, 12 Ω-cm resistivity silicon wafers as substrates.

The deposition of PSG and BPSG films was carried out in a horizontal hot wall LPCVD reactor (Karat model) [18], using liquid reagents. Since the liquid reagents have different saturated-vapor pressure at the same temperature, the separate bubbling evaporators were used for each liquid

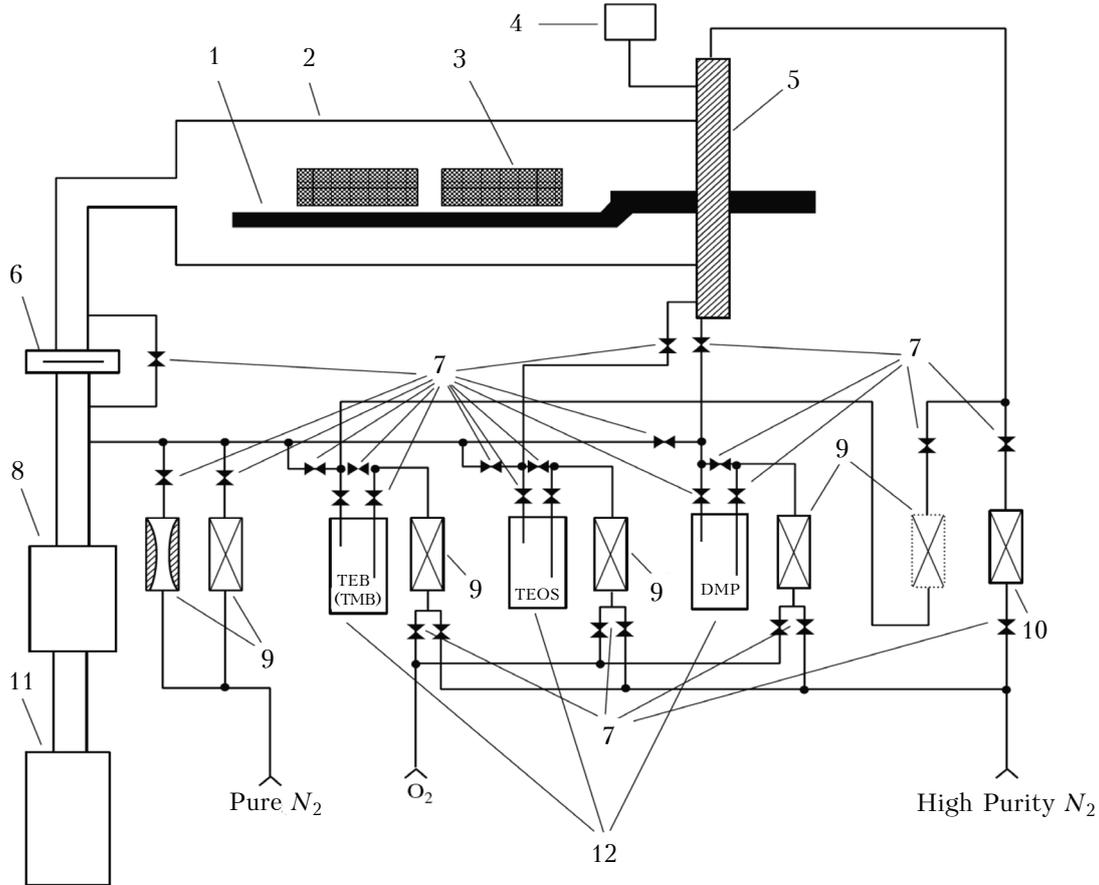


Fig. 2. Gas and vapor distribution system of the LPCVD reactor:

- 1 – SiC cantilever; 2 – quartz reactor; 3 – wafer boat; 4 – pressure gauge; 5 – shutter; 6 – vacuum gate; 7 – valves;
- 8 – nitrogen trap; 9 – mass flow controllers; 10 – valve with calibrated orifice for nitrogen backfill; 11 – vacuum pumps;
- 12 – TEB (TMB), TEOS, DMP bubblers (the TEOS and DMP bubblers use the carrier gas)

reagent. The gas and vapor distribution system is presented in Fig. 2.

The special liquid vaporizing system was used to provide the stable pressure and flow of TEOS vapor. This system contains the bulk supply container (10 liters), compartment with metallic container (bubbler) for holding TEOS to be vaporized, mass flow controller (MFC) for carrier gas and a bubbling tube inserted into bubbler, an outlet pipe for ejecting TEOS vapor with carrier gas, liquid supply pipe for refilling the bubbler from bulk container, temperature detection and adjustment means for maintaining the TEOS temperature and temperature inside the bubbler compartment. This liquid vaporizing system can be operated under temperatures above 50°C, which are needed for TEOS evaporation in case of BPSG deposition in horizontal LPCVD reactor. The TEOS vapor pipes to reactor were electrically heated 5–10°C above the temperature of the bubbler, using insulated wire.

The liquid source materials were TEOS (distilled), dimethylphosphite, and trimethylborate conforming to the Russian technical specifications TY 2637-059-44493179-04, TY 2634-002-40475629-99, and TY 2634-001-40475629-99, respectively. They were evaporated in the respective temperature ranges 55–57, 22–24, and 20–40°C, with each temperature point maintained to within  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . The wafers were placed in specially designed perforated quartz boats. The wafer spacing was 7.5 mm.

The PSG films were deposited at 680–715°C and 45 $\pm$ 3 Pa; the BPSG films – at 660–690°C and 45 $\pm$ 3 Pa. The chamber pressure was maintained by feeding nitrogen through MFC. The carrier gas was oxygen or nitrogen; its flow rate through each bubbler was 200 sccm or less.

The PSG and BPSG deposition process included the following steps:

1. Loading wafers into the chamber and nitrogen purge through the chamber;
2. Chamber pumpdown;
3. Nitrogen purge of the chamber;
4. Chamber pumpdown, temperature stabilization at given values;
5. Leak check;
6. Chamber pumpdown;
7. Deposition of BPSG films;
8. Nitrogen purge of the chamber and chamber pumpdown;
9. Repeat step 8 an appropriate number of times;
10. Chamber backfill using nitrogen until atmospheric pressure is reached;
11. Unloading wafers.

Film thickness was measured by spectrophotometry (Leica's MPV-SP), the phosphorus concentration by X-ray fluorescence (Rigaku's M3613), the boron concentration by infrared (IR) spectroscopy (SPECORD-75) and Fourier-transform spectroscopy (FSM-1201 FTIR analyzer), and refractive index by laser ellipsometry (LEF-3M).

The test structure, having the polysilicon lines 1  $\mu\text{m}$  thick was used for evaluating topology planarity. The films 0.75 $\pm$ 0.05  $\mu\text{m}$  thick were subjected to thermal reflow in dry oxygen at 850°C during 45 min for BPSG or at 950°C during 30 min for PSG. The topology planarity was evaluated by measuring the slope angle  $\alpha$  after reflow [4, 8] as seen in cross-sectional scanning-electron-microscope images.

### Results and discussion

Fig. 3 and 4 depict the observed dependence of P concentration in PSG films on deposition temperature and DMP temperature, respectively, with the carrier gas flow rate maintained at 200 sccm. The P concentration decreases steadily from 10.0 to 6.0 wt% as the deposition temperature is elevated from 680 to 715°C when DMP temperature is about 30°C (Fig. 3). It also increases steadily with DMP temperature (Fig. 4).

When nitrogen is used as the carrier gas, increasing its flow rate from 67 to 200 sccm reduces the PSG deposition rate from 7.5 to 5.5 nm/min, that can be explained by the TEOS partial pressure reduction. The carrier-gas flow rate has a significant influence on the wafer-to-wafer (w/w) thickness uniformity: raising the former to 200 sccm

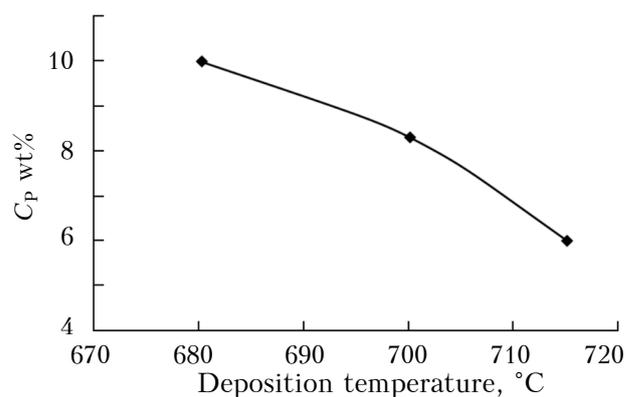


Fig. 3. Phosphorus concentration vs. deposition temperature for PSG films

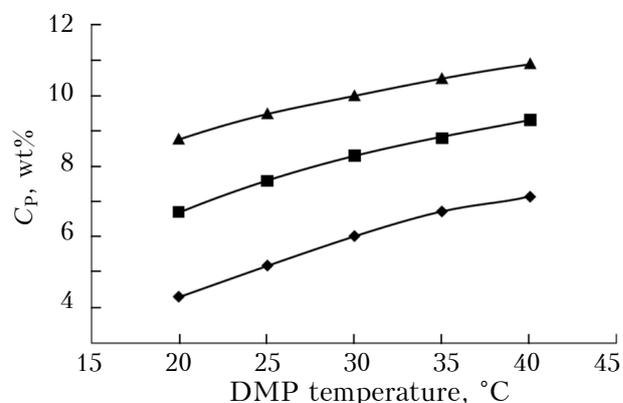


Fig. 4. Phosphorus concentration vs. DMP temperature for PSG films at a deposition temperature of 715 (◆), 700 (■) and 680 °C (▲)

improves the w/w thickness uniformity from  $\pm 12.6$  to  $\pm 4.6\%$ . Using oxygen as the carrier gas increases the deposition rate by a factor of 1.3 and provides an increase in average P concentration by about 1.5 wt%. Those might be related to the increase in the number of P–O bonds in the film being deposited. The within wafer thickness uniformity of PSG films was less than  $\pm 5.0\%$  for each of the processes performed. The PSG films have a refractive index of  $1.45 \pm 0.01$ .

The dependences of phosphorus concentration on the deposition temperatures and DMP bubbler temperature makes enable to control the concentration of phosphorus over wide ranges.

The process temperature is known to be a major factor in BPSG deposition using the TEOS–TMPO–TMB system [21, 22]. It has been found experimentally that phosphorus plays the central

role because its excess or deficiency accelerates or inhibits the deposition process, respectively. Note also that it is very difficult to provide an adequate thickness uniformity when the deposition process is carried out at 590–680°C, on the other hand, lower temperatures result in a sharp decrease in deposition rate. Therefore, the determination of optimal BPSG deposition conditions should be based on a compromise between individual process parameters.

Using the TEOS–DMP–TEB(TMB) system, we have obtained stable BPSG films with  $C_P + C_B = 8.5–9.3$  wt% and  $C_B = 3.4–4.7$  wt% (see Table 2). Acceptable slope angles after reflow have been achieved at  $C_P + C_B = 8.7–9.2$  wt% and  $C_P = 2.4–5.0$  wt% (see Table 3). It was defined that the formation of boric acid crystals in 8 hours after deposition when boron concentration

was more than 6.3 wt%. With phosphorus concentration over 5 wt% the defect formation after thermal treatment was observed. The side wall step coverage by BPSG films was 0.56 at 320°C, 0.73 at 430°C and 0.87 at 650°C [9], which are in good agreement with experimental results of other authors [23, 24].

Table 4 lists major process characteristics and compares them with those reported previously. Since the BPSG deposition rate is very sensitive to the DMP flow rate, it is advantageous to maintain  $C_P$  between 3.0 and 3.8 wt% to provide the stability and reproducibility of film thickness uniformity. Such BPSG films are deposited at 9.0–10.0 nm/min and have a refractive index of 1.45–1.46.

When DMP is used as a phosphorus source, the  $C_P$  profile is virtually independent on the deposition temperature profile. The TEOS, DMP, and TEB flow rates – and therefore  $C_B$  and  $C_P$  – are mostly determined by the bubbler temperatures. For the first time, it was found that there is no depletion in phosphorus

BPSG film stability

Table 2

Process no.	$C_P$ , wt %	$C_B$ , wt %	$C_P + C_B$ , wt %	Defect formation in X hours after deposition				
				0,3 h	2 h	4 h	24 h	72 h
1	4.8	7.5	12.3	+	+	+	+	+
2	2.7	6.9	9.6	–	+	+	+	+
3	6.2	4.4	10.9	–	+	+	+	+
4	1.2	7.0	8.2	–	–	+	+	+
5	1.7	6.9	8.6	–	–	+	+	+
6	6.5	3.7	10.2	–	–	+	+	+
7	7.0	3.5	10.5	–	–	+	+	+
8	7.1	3.2	10.3	–	–	+	+	+
9	1.6	6.6	8.2	–	–	–	+	+
10	2.4	6.4	8.8	–	–	–	+	+
11	3.2	6.0	9.2	–	–	–	+	+
12	5.1	4.5	9.6	–	–	–	+	+
13	5.6	4.2	9.8	–	–	–	+	+
14	6.1	3.6	9.7	–	–	–	+	+
15	7.4	2.5	9.9	–	–	–	+	+
16	3.0	5.8	8.8	–	–	–	–	+
17	3.9	5.0	8.9	–	–	–	–	+
18	4.7	4.9	9.6	–	–	–	–	+
19	5.0	4.1	9.1	–	–	–	–	+
20	4.2	4.7	8.9	–	–	–	–	–
21	4.8	3.8	8.6	–	–	–	–	–
22	5.1	3.4	8.5	–	–	–	–	–
23	5.9	3.4	9.3	–	–	–	–	–

Note: The plus and minus signs indicate the presence and absence of defects, respectively.

Slope angle  $\alpha$  after BPSG reflow as dependent on film properties and process parameters

Table 3

Wafer no.	Film thickness, $\mu\text{m}$	$C_P$ , wt%	$C_B$ , wt%	$C_P + C_B$ , wt%	$\alpha$ , deg	Deposition rate, nm/min	Thickness uniformity within wafer, $\pm\%$
1	0.75	2.4	6.4	8.8	39	7.0	4.2–6.0
2	0.73	5.0	4.1	9.1	31	11.9	5.0–6.8
3	0.76	2.8	5.9	8.7	35	7.9	3.4–4.2
4	0.60	1.2	7.0	8.2	61	4.8	2.1–2.7
5	0.75	6.1	3.6	9.7	46	14.7	3.9–5.6
6	0.74	4.6	4.5	9.1	30	11.6	2.4–5.3
7	0.39	3.2	6.0	9.2	39	8.9	2.8–4.6

Table 4

Major characteristics of BPSG deposition process as compared with previous results

Reagents	Through-put, wafers/batch	Wafer diameter, mm	Pressure, Pa	Temperature, °C	Deposition rate, nm/min	C <sub>P</sub> , wt %	C <sub>B</sub> , wt %	Thickness uniformity within wafer, ±%	Dopant range, w/w, ± wt %
TEOS, PH <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> , TMPO, TMPite [4]	90	100	66.5	620–680	15	10.8	5.6	4.0	1.5
TEOS, TMB, TMPite, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> [4]	50	60	40–106	675–750	10–30	4.0	4.0	–	–
DMDCS, phosphorus chlorides, ethyl borates, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> [4]	50	100	200	750–850	8–13	9.7	9.5	5.0	–
TEOS, TMB, TMPite, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> [4]	30	100	40	510–680	5–15	5.0	13	10.0	–
DADBS*, TMB, TMPite [4]	50	60	66.5	470–550	2–25	4.0	5	–	–
TEOS, DMP, TEB (TMB) [present work]	50	150	45	660–690	9.0–10.0	3.0 ... 3.5	5.0 ... 5.5	4.8	0.4

\* DADBS — di-acetoxy-di-t-butoxy-silane.

concentration along the deposition zone when the TEOS–DMP–TEB system is employed; and C<sub>B</sub>+C<sub>P</sub> is almost uniform.

As-deposited films have mirror-like surface and roughness of 0.3–0.35 nm, which is three times lower than that for BPSG films in [23] and 2.7–3.6 lower than for PSG films, obtained using TEOS-DMP (0.97–1.09 nm).

BPSG films have density of 2.22 g/cm<sup>3</sup> at 320–430°C and 2.30 g/cm<sup>3</sup> at 650°C, respectively [10]. Note that BPSG flowability is more sensitive

to boron than to phosphorus; for example, reducing α from 30° to 20° requires 1 wt% increase in C<sub>B</sub> or 7 wt% increase in C<sub>P</sub> [21].

Fig. 5 depicts a correlation between moisture absorption and dopant concentrations for BPSG films, which were defect-free in 24 hours after the deposition (H — moisture penetration depth). Previously, stable BPSG films were produced with deposition followed up by in-situ thermal reflow. This was necessary because the range of optimum boron and phosphorus concentrations was above

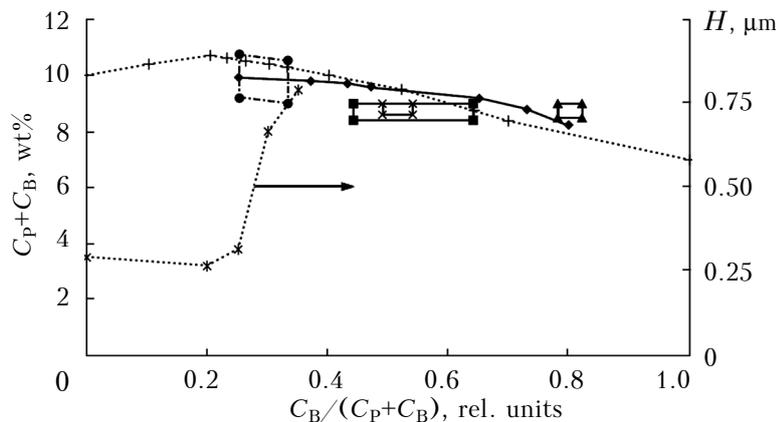


Fig. 5. Correlation between the moisture absorption and dopant concentrations of BPSG films [13]:

◆ — defect formation boundary [this work]; ▲ — TEOS–DMP [this work]; ■ — TEOS–TMPate [13]; × — APCVD BPSG [26]; \* — moisture penetration depth [28]; ● — optimum region [25]; + — defect formation boundary [25]

the defect formation boundary, as seen in Fig. 5. In another study, 24-h stability of BPSG films was achieved within narrow ranges of C<sub>B</sub> and C<sub>P</sub> [26]. Using the TEOS–DMP–TEB system, we were able to expand dopant concentration ranges because DMP allows obtaining higher phosphorus concentration under higher deposition temperatures; furthermore, the range of optimum boron and phosphorus concentrations is below the defect formation boundary (Fig. 5).

In situ thermal reflow [13] was also employed in the present study and it as well allowed to obtain BPSG films that were immune to defect formation in the subsequent process steps and during storage, and to considerably reduce the defect density by eliminating exposure of as-deposited films to the air.

Table 5

The comparison of deposition process parameters and properties of BPSG films, obtained on different types of tool [27]

Parameter	Tool model		
	Horizontal LPCVD system "Karat"	Concept-1 (Novellus)	Precision-5000 (Applied Materials)
Process type	Low pressure CVD	Plasma enhanced CVD	Plasma enhanced CVD
Reactor type	Batch (Furnace)	Single wafer (multiposition)	Single wafer
Temperature	700°C	400°C	39°C
Silicon source	TEOS	SiH <sub>4</sub>	TEOS
Phosphorus and boron source	DMP, TMB	PH <sub>3</sub> , B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	TMPO, TMB
Deposition rate, nm/min	9.4	700	760
Within wafer thickness uniformity (6 inch), %	≤±5.0	≤±1.5	≤±2.0
Refractive index	1.46±0.01	1.46±0.01	1.46±0.01
Density, g/cm <sup>3</sup>	2.28–2.3	2.12–2.18	2.12–2.27
Range of optimal dopant concentration, wt%, and time to defect formation, h	P: 3.0–4.0 B: 6.0–5.0 >>24	P: 4.0–4.5 B: 4.5–4.0 >24	P: 3.0–3.5 B: 5.5–5.0 >24
Total dopant concentration, wt%	8.5–9.0	8.0–8.5	8,0–8.5
Throughput, w/h	12–15	20	20 (2 chamber)

Note: Boron and phosphorus concentration uniformity are ±0.5 и ±0.2 wt%, respectively.

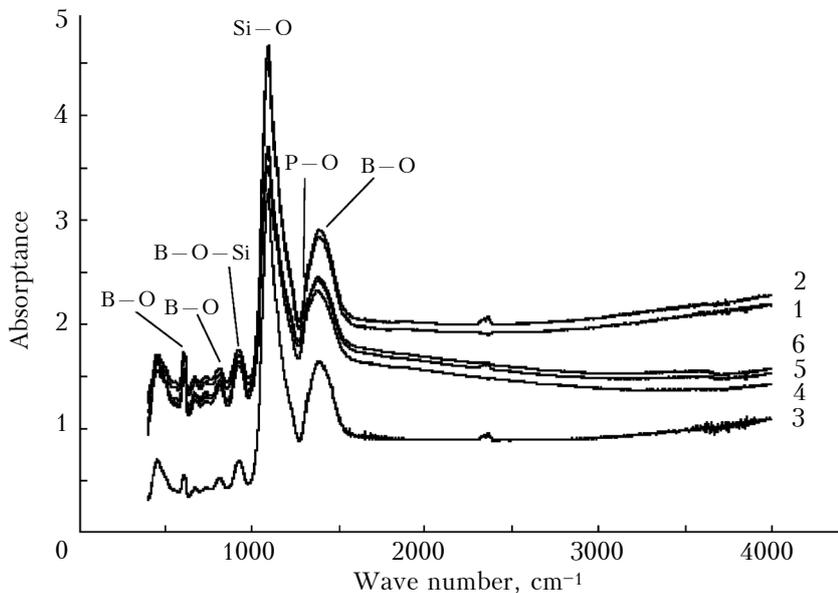


Fig. 6. IR absorption spectra of BPSG films measured immediately after deposition (1, 4), 12 days (2, 5) and 30 days (3, 6) after deposition, and of films subjected to in-situ thermal reflow (4–6)

Table 5 lists the comparison of deposition process parameters and properties of BPSG films, obtained on different types of tool [27].

Fig. 6 presents the IR absorption spectra of BPSG films some of which were subjected to in situ thermal reflow, the spectra being measured immediately, 12 days, and 30 days after deposition. It is seen that the spectra of as-deposited films, whether or not thermal reflow has been applied, do not exhibit dips or oscillations in the wave-number ranges 2900–3640 and 1500–1600 cm<sup>-1</sup>,

indicating zero water content. During 12 days of storage, BO–H bonds are formed in unreflowed films, as evidenced by weak peaks near 2250 cm<sup>-1</sup> and oscillations in the ranges 2900–4000 and 1500–1600 cm<sup>-1</sup> [28]. The spectra of reflowed films do not have such peaks and show small oscillations over the wave numbers 1500 to 1600 cm<sup>-1</sup>. Dips in the range 3500–3800 cm<sup>-1</sup> start to appear after the 14<sup>th</sup> day of storage. Thus, the IR spectroscopy data provide evidence that the BPSG deposition method used in this study

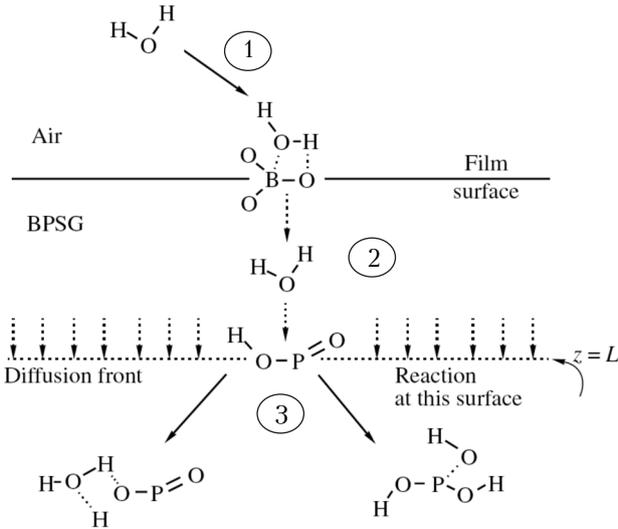


Fig. 7. Mechanism of glass-water interaction in a BPSG film:  
 1 – water adsorption at B–O surface centers; 2 – bulk and surface diffusion of water molecules toward P centers; 3 – reaction with P–O or the formation of a hydrogen bond with P–O

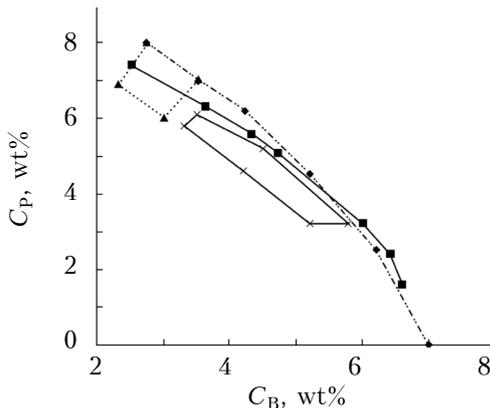


Fig. 8. Ranges of optimum B and P concentrations in BPSG films identified in this study and earlier from the viewpoint of structural quality and planarity:  
 ◆ – defect limit [29]; ■ – defect limit [this study];  
 ▲ – optimum range [29]; × – optimum range [this study]

research allows to obtain films of low porosity and sufficiently high density, which absorb less moisture in storage.

In porous BPSG films, moisture absorption is assumed to proceed through pores. For dense, reasonably ordered films, the mechanism is more complicated; it is illustrated in Fig. 7 [28]. Water molecules are first adsorbed by B–O bonds. Then adsorbed water molecules diffuse inward and react with P–O groups, forming P=O and PO=H bonds; the reaction with P=O constitutes the rate-determining step of adsorption. However, if the porosity is high enough, diffusion proceeds much faster than this reaction, resulting in a linear dependence of moisture penetration depth on storage time; that is typical for boron-rich BPSG

films. Indeed, BPSG films deposited using the TEOS–DMP–TEB system are characterized by a smaller moisture penetration depth as compared with films obtained by hydride oxidation. The defect formation boundary for such BPSG films moves to higher B concentrations (Fig. 5). Thus, obtained BPSG films are less reactive with moisture and have a high density. These are characteristic features of type II films, which have a dense structure and homogenous distribution of boron and phosphorus oxides [29].

Fig. 8 compares the regions of optimal dopant concentrations in BPSG films identified in this study and earlier from the viewpoint of film stability and planarity after reflow. Note also that TEB can be replaced with TMB, a less expensive reagent, without compromising the structural stability, moisture resistance, and other important properties of films. Having a higher vapor pressure, TMB requires no bubbling, provides a more uniform boron concentration along the deposition zone, and is consumed in smaller quantities.

The combined process of BPSG deposition and in-situ thermal reflow is protected by patent [30], as well as the PSG deposition process using the TEOS–DMP system [31, 32] and the BPSG deposition process using the TEOS–DMP–TEB (TMB) system [33, 34].

**Conclusions**

The authors investigated the chemical vapor deposition of PSG and BPSG films from the TEOS–DMP–TEB(TMB) reactant system at 660–715°C in horizontal LPCVD reactor equipped with a specifically designed system for supplying each liquid reagent to reactor. The special liquid vaporizing system was used to provide the stable pressure and flow of TEOS vapor.

The authors found that using the DMP allows varying the concentration of phosphorus in PSG films over wide ranges. We identified the optimal range of the total boron and phosphorus concentration ensuring the acceptable topology planarity and resistance to defect formation during storage that is 8.7–0.3 wt% when the phosphorus concentration is 3.0–3.8 wt%. The defect formation boundary for such BPSG films moves to higher B concentrations. We found that at use of the TEOS-DMP–TEB system the depletion of the phosphorus concentration along reaction zone does not occur, and the total dopant concentration is practically constant. The developed process has the deposition rate of 9.0–10.0 nm/min and ensures the good film thickness uniformity and the reduced reaction capability of BPSG films against atmospheric moisture. The side wall step coverage by BPSG films was 0.56 at 320°C, 0.73 at 430°C and 0.87 at 690°C. As-deposited films have mirror-like surface and roughness of 0.3–0.35 nm, that is 2.7–3.6 times lower than for PSG films, obtained using TEOS-DMP (0.97–1.09 nm).

In situ thermal reflow was also employed in the present study and it as well allowed to obtain BPSG films that were immune to defect forma-

tion in the subsequent process steps and during storage, and to considerably reduce the defect density by eliminating exposure of as-deposited films to the air.

## REFERENCES

1. Labunov V. A., Nemtsev V.S., Danilovich I.I. Topography planarization in LSI manufacture. *Zarubezh. Elektron. Tekh.*, 1987, no. 8, pp. 3–23. [В.А. Лабунов, В.С. Немцев, И.И. Данилович. Планаризация топологического рельефа в технологии БИС. *Зарубежная электронная техника*, 1987, № 8, с. 3-23.]
2. Skidmore K. Techniques for planarizing device topography. *Semicond. Int.*, 1988, no. 4, pp. 115–119.
3. Saxena A.N., Pramanik D. Planarization techniques for multilevel metallization. *Solid State Technol.*, 1986, vol. 29, no. 10, pp. 95–100.
4. Dukhanova T.G., Vasilev V.Y., Veretenin V.I. Deposition, properties, and applications of borophosphosilicate glass films in ICs. *Obz. Elektron. Tekh., Ser. 3*, 1988, iss. 4 (1370), pp. 2–72. [Духанова Т.Г., Васильев В.Ю., Веретенин В.И. Получение, свойства и применение слоев борофосфоросиликатного стекла в технологии интегральных схем. *Обзоры по электронной технике, серия 3. Микроэлектроника*, 1988, вып.4 (1370), с. 2-71.]
5. Jagadeesha T., Kim L., Gonsalvis J., Gowda T. Innovative low pressure borophosphosilicate glass process for nano devices. *Indian J. of Engineering and Material Science*, 2009, vol. 16, pp. 341-346.
6. Repinski S.M. Chemical kinetics of dielectric film growth. In book "Current issues in the physical chemistry of semiconductor surfaces". Novosibirsk, Nauka, 1988, pp. 90–152. [Репинский С.М. Химическая кинетика роста слоев диэлектриков. В кн. «Современные проблемы физической химии». Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1988, с.90-152.]
7. Semenov I.I. *Chain Reactions*, Moscow: Nauka, 1986, pp. 163–192. [Семенов И.И. *Ценные реакции*, М: Наука, 1986, с.163-192.]
8. Vasilev V.Y., Sukhov M.S. Equipment and techniques for low-pressure chemical vapor deposition. Part 1. *Obz. Elektron. Tekh., Ser. 7*, 1985, iss. 4, p. 52. [Васильев В.Ю., Сухов М.С., Аппаратура и методика осаждения слоев при пониженном давлении. Ч. 1. *Обзоры по ЭТ, Сер.7*, 1985, вып. 4, с. 52.]
9. Turtsevich A.S., Gran'ko V.I., Shilo O.A., Tikhonov V.I. Environmental issues in chemical vapor deposition. *Elektron. Prom-st.*, 1993, no. 10, pp. 87–95. [Турцевич А.С., Гранько В.И., Шило О.А., Тихонов В.И. Экологические проблемы химического осаждения из газовой фазы. *Электронная промышленность*, 1993, вып. 10, с. 87-95.]
10. Turtsevich A.S., Zaitsev D.A., Kabakov M.M., Shilo O.A., Misyuchenko V.M., Tikhonov V.I. Planarity of borophosphosilicate-glass films as dependent on the deposition Conditions. *Elektron. Tekh., Ser. 3*, 1992, issue 1 (146), pp. 24–27. [Турцевич А.С., Зайцев Д.А., Кабаков М.М., Шило О.А., Мисюченко В.М., Тихонов В.И. Влияние условий осаждения борофосфоросиликатного стекла на планарность топологического рельефа интегральных схем. *Электронная техника, Сер.3*, 1992, вып.1 (146), с. 24-27.]
11. Jagadeesha T., Kim L., Lee W.T., Gowda T. Development of new BPSG process to reduce boron concentration range in BPSG SAVD process. *Int. J. of Engineering Science and Technology*, 2011, vol. 3, no. 1, pp. 156-161.
12. Dimethylphosphite: TU 2634-002-40475629-99 Specification.
13. Turtsevich A.S., Zakharik S.V., Makarevich I.I., Nalivaiko O.Yu., Anoshin V.M., Rumak N.V., Turtsevich, V.V. Deposition of borophosphosilicate-glass films from the TEOS-TMPate-TMB-O<sub>2</sub> reactant system. *Elektron. Prom-st.*, 1995, no. 3, pp. 19–22. [Турцевич А.С., Захарик С.В., Макаревич И.И., Наливайко О.Ю., Аношин В.М., Румак Н.В., Турцевич В.В. Осаждение слоев борофосфоросиликатного стекла в системе ТЭОС-ТМФ'ат-ТМБ-О<sub>2</sub>. *Электронная промышленность*, 1995, № 3, с. 19-22.]
14. Becker F.S., Pawlik D., Schäfer M., Staudigl G. Process and film characterization of low pressure tetraethyl-orthosilicate-borophosphosilicate glass. *J. Vac. Sci. Technol., B*, 1986, vol. 4, no. 3, pp. 732–744.
15. Williams D.S., Dein E.A., LPCVD of borophosphosilicate glass from organic reactants. *J. Electrochem. Soc.*, 1987, vol. 134, no. 3, pp. 657–664.
16. Turtsevich A.S., Rumak N.V., Misyuchenko V.M., et al. Influence of dopant concentrations on defect formation in borophosphosilicate-glass films. *Vestsi NAN Belarusi, Ser. Fiz.-Tekh. Navuk*, 1993, no. 4, pp. 70–73. [Турцевич А.С., Румак Н.В., Мисюченко В.М. и др., Влияние концентрации легирующих приседей на процессы дефектообразования в пленках борофосфоросиликатного стекла. *Вестни АНБ Сер. физ.-техн.*, 1993, № 4, с. 70-73.]
17. Levy R.A., Vincent S.M., McGahan, T.E. Evaluation of the phosphorus concentration and its effect on viscous flow and reflow in phosphosilicate glass. *J. Electrochem. Soc.*, 1985, vol. 132, no. 6, pp. 1472–1480.
18. Turtsevich A.S., Anufriev L.P., Nalivaiko O.Yu. Silicon nitride film deposition by dichlorosilane ammonolysis in a Karat LPCVD reactor. *Izv. Belarus. Inzh. Akad.*, 2004, no. 2 (18), pp. 104–106. [Турцевич А.С., Ануфриев Л.П., Наливайко О.Ю. Процесс осаждения пленок нитрида кремния аммонолизом дихлорсилана в реакторе пониженного давления «Карат». *Материалы IX Междунар. науч.-технич. конф. «Современные средства связи», Беларусь, Нарочь, 27.09–1.10 2004. Известия Белорусской инженерной академии*, 2004, № 2 (18), с. 104-106.]
19. Vasilev V.Y., Dukhanova T.G., Borophosphosilicate glass composition optimized for IC manufacture. *Elektron. Prom-st.*, 1989, no. 3, p. 31. [Васильев В.Ю., Духанова Т.Г. Оптимальный для технологии ИС состав слоев борофосфорно-силикатного стекла. *Электронная промышленность*, 1989, № 3, с. 31.]
20. Kim H.-J., Choi P., Kim K., Choi B. A study on the fluorine effect of direct contact process in high-doped boron phosphorus silicate glass (BPSG). *J. of Semiconductor Technology and Science*, 2013, vol. 13, no. 6, pp. 662-667.
21. Rumak N.V., Khat'ko V.V. *Dielectric films in solid-state microelectronics*. Minsk: Nauka i Tekhnika, 1990, pp. 140–141. [Румак Н.В., Хатько В.В. *Диэлектрические пленки в твердотельной микроэлектронике*. Минск: Наука и техника, 1990, с. 140-141.]
22. Rumak N.V., Turtsevich A.S., Shilo O.A., Tikhonov V.I. Planarity of borophosphosilicate-glass films as dependent on the deposition temperature. *Vestsi NAN Belarusi, Ser. Fiz.-Tekh. Navuk*, 1993, no. 2, pp. 54–56. [Румак Н.В., Турцевич А.С., Шило О.А., Тихонов В.И. Влияние температуры осаждения борофосфоросиликатного стекла на планарность топологического рельефа интегральных схем. *Вестни АН БССР, Сер. физ.-техн.*, 1993, № 2, с. 54-56.]
23. Levy L.A., Gallagher P.K., Schery E. A new LPCVD technique of producing borophosphosilicate glass films by injection of miscible liquid precursors. *J. Electrochemical Society*. 1987, vol. 134, no 2. pp. 430-436.
24. Vasilev V.Y., Borophosphosilicate glass films as interlayer isolation of IC. *Elektron. Prom-st.*, 1986, no. 1, p. 23-26. [Васильев В.Ю., Духанова Т. Г. Слои борофосфоросиликатного стекла в качестве межслойной изоляции ИС. *Электронная промышленность*. 1986, вып. 1(149), с. 23-26.]
25. Vasilev V.Y. Borophosphosilicate glass films in silicon microelectronics. Part 1: Chemical vapor deposition, composition, and properties. *Russ. Microelectron.*, 2004, vol. 33, no. 5, pp. 271–284 [Васильев В.Ю. Тонкие слои борофосфоросиликатного стекла в технологии кремниевой микроэлектроники. Часть 1. Осаждение из газовой фазы и свойства слоев стекла. *Микроэлектроника*, 2004, т. 33, № 5, с. 334-351.]

26. Turtsevich A.S., Nalivaiko O.Yu., Zaitsev D.A., Gran'ko, V.I., Makarevich I.I. Simulation of deposition of borophosphosilicate glass obtained by hydride oxidation at atmospheric pressure. *Russ. Microelectron*, 1996, vol. 25, no. 6, pp. 398–403. [Турцевич А.С., Наливайко О.Ю., Зайцев Д.А., Гранько В.И., Макаревич И.И. Моделирование процесса осаждения борофосфоросиликатного стекла, полученного окислением гидридов при атмосферном давлении. *Микроэлектроника*, 1996, т. 25, № 6, с. 451–457.]

27. Nalivaiko O.Yu., Pshenichny E.N., Plebanovich V.I. et al. The comparison of BPSG deposition processes in horizontal low pressure CVD reactor and in plasma enhanced CVD reactors. *V Int. scient. and techn. conf. "Electronics and informatics 2005"*, Moscow – Zelenograd, 2005, vol.1, pp. 143–144. [Наливайко О.Ю., Пшеничный Е.Н., Плебанович В.И. и др. Сравнение процессов осаждения и пленок БФСС в горизонтальном реакторе пониженного давления и в реакторах с плазменной активацией процесса. *V Междунар. научн.-техн. конф. «Электроника и информатика 2005»*, Москва – Зеленоград, 2005, ч. 1, с. 143–144.]

28. Thorsness A.G., Muscat A.J. Moisture absorption and reaction in BPSG thin films. *J. Electrochem. Soc.*, 2003, vol. 150, no. 12, pp. F219–F228.

29. Vasilev V.Y. Borophosphosilicate glass films in silicon microelectronics. Part 2: Structure and applications. *Russ.*

*Microelectron*, 2005, vol. 34, no. 2, pp. 67–77. [Васильев В.Ю. Тонкие слои борофосфоросиликатного стекла в технологии кремниевой микроэлектроники. Часть 2. Стрение стекол и их применение в технологии. *Микроэлектроника*, 2005, т. 34, № 2, с. 83–97.]

30. *Belarus Patent 2823*, Published Sept. 30, 1999. [Патент РБ 2823, Способ планаризации кремниевых структур. 30.09.1999г.]

31. *Belarus Patent 2531*, Published Dec. 30, 1998. [Патент РБ 2531, Способ осаждения фосфоросиликатного стекла. 30.12.1998г.]

32. *Belarus Patent 3924*, Published June 30, 2001. [Патент РБ 3924, Способ осаждения фосфоросиликатного стекла. 30.06.2001г.]

33. *Belarus Patent 1613*, Published Mar. 30, 1997. [Патент РБ 1613, Способ получения пленок борофосфоросиликатного стекла. 30.03.1997г.]

34. *Belarus Patent 4154*, Published Dec. 30, 2001. [Патент РБ 4154, Способ получения пленок борофосфоросиликатного стекла. 30.12.2001г.]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 09.08 2014 г.*

А. С. ТУРЦЕВИЧ, О. Ю. НАЛИВАЙКО

Республика Беларусь, г. Минск, ОАО «ИНТЕГРАЛ»  
E-mail: Aturtsevich@integral.by, onalivaiko@integral.by

## ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК БОРОФОСФОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ТЭОС-ДИМЕТИЛФОСФИТ-ТРИМЕТИЛБОРАТ

*Проведена модернизация горизонтального реактора пониженного давления. Разработана система подачи жидкого реагента с использованием барботеров. Исследованы процессы осаждения пленок и свойства пленок ФСС и БФСС с использованием системы ТЭОС-диметилфосфит(ДМФ)-триметилборат(ТМФ).*

*Ключевые слова: борофосфоросиликатное стекло, осаждение, планарность топологического рельефа.*

DOI: 10.15222/ТКЕА2015.1.49  
УДК.621.315.612

А. С. ТУРЦЕВИЧ, О. Ю. НАЛИВАЙКО

Республика Беларусь, м. Минск, ВАТ «ИНТЕГРАЛ»  
E-mail: Aturtsevich@integral.by, onalivaiko@integral.by

## ОСАДЖЕННЯ ПЛІВОК БОРОФОСФОРОСІЛІКАТНОГО СКЛА З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ ТЕОС-ДІМЕТИЛФОСФІТ-ТРИМЕТИЛБОРАТ

*Проведено модернізацію горизонтального реактора зниженого тиску. Розроблено систему подачі рідкого реагенту з використанням барботерів. Досліджено процеси осадження плівок і властивості плівок ФСС і БФСС з використанням системи ТЕОС-діметилфосфит(ДМФ)-триметилборат(ТМФ).*

*Показано, що використання діметилфосфіта дозволяє варіювати концентрацію фосфору в широкому діапазоні. Встановлено, що оптимальний діапазон сумарних концентрацій бору та фосфору, що забезпечує прийнятну планарність топологічного рельєфу і стійкість до дефектоутворення при зберіганні, складає 8.7–0.3 ваг.%, При цьому концентрація фосфору становить 3.0–3.8 ваг.%. Встановлено, що при використанні системи ТЕОС–ДМФ–ТМБ не відбувається збіднення концентрації фосфору уздовж реакційної зони, а сумарна концентрація легуючих домішок залишається практично постійною. У той самий час забезпечуються швидкість осадження плівок БФСС 9.0–10.0 нм/хв та хороша однорідність товщини плівок. Свіжоосажені плівки мають «дзеркальну поверхню», що підтверджує їх мінімальну шорсткість. Плівки БФСС оптимального складу характеризуються зниженою реакційною здатністю по відношенню до атмосферної вологи.*

*Ключові слова: борофосфоросілікатне скло, осадження, планарність топологічного рельєфу.*

## УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2014 г.

### Электронные средства: исследования, разработки

Классификация методов измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов. *Ермоленко Е. А.* 2–3

Экспресс-метод оценки изменений температуры элементов РЭА. *Оборский Г. А., Савельева О. С., Шихирева Ю. В.* 2–3

Моделирование технического ресурса радиоэлектронных средств. *Невлюдова В. В.* 4

Поиск оптимальных размеров печатных плат для несущих конструкций электронных средств. *Ефименко А. А., Карлангач А. П., Лазарев С. Н.* 5–6

### СВЧ-техника

Компенсация паразитных элементов транзистора с настройкой импедансов на гармониках в усилителе класса F. *Ефимович А. П., Крыжановский В. Г.* 1

Поглотители СВЧ-энергии с высокой теплопроводностью на основе AlN и SiC с добавками молибдена. *Часнык В. И., Фесенко И. П.* 1

Использование щелевых резонаторов для проектирования усилителя мощности с манипуляцией гармоник. *Рассохина Ю. В., Крыжановский В. Г., Коваленко В. А., Colantonio P., Giofre R.* 2–3

Двухканальный переключатель СВЧ-мощности на основе электрически активных полупроводниковых структур. *Лаврич Ю. Н., Плаксин С. В., Крысь В. Я., Погорелая Л. М., Соколовский И. И.* 2–3

Поглотители СВЧ-энергии на основе нитрида алюминия с высоким уровнем поглощения. *Часнык В. И.* 4

### Системы передачи и обработки сигналов

Инвариантность текущего энергетического Фурье-спектра действительных дискретных сигналов на конечных интервалах. *Пономарев В. А., Пономарева О. В.* 1

Локальная оценка параметров траектории и обнаружение двужущихся целей на фоне релейской помехи. *Прокопенко И. Г., Вовк В. Ю., Омельчук И. П., Чирка Ю. Д., Прокопенко К. И. (на английском языке)* 1

Система передачи данных с шифрованием хаотическими последовательностями. *Политанский Р. Л., Шпатарь П. М., Гресь А. В., Верига А. Д.* 2–3

Кодер и декодер фрактальных сигналов гребенчатой структуры. *Политанский Р. Л., Верига А. Д.* 4

Новый импульсный модулятор с малой частотой переключений. *Голуб В. С.* 5–6

### Энергетическая электроника

Схемотехника источников питания для импульсно-дуговой сварки с хаотическими колебаниями тока. *Сидорец В. Н., Бушма А. И., Жерносеков А. М.* 2–3

Гибридные энергонакопители на основе аккумуляторов и суперконденсаторов для контактной микросварки. *Бондаренко Ю. В., Сафронов П. С., Бондаренко А. Ф., Сидорец В. Н., Рогозина Т. С.* 4

### Сенсоэлектроника

Трехпараметрический генераторный датчик. *Филинюк Н. А., Лищинская Л. Б., Лазарев О. О., Ткачук Я. С.* 4

### Биомедицинская электроника

Термоэлектрический источник питания для электронного медицинского термометра. *Анатычук Л. И., Кобылянский Р. Р., Константинович И. А.* 4

### Функциональная микро- и нанoeлектроника

Кинетика деформации ВАХ оксидных варисторных структур, обусловленная перезарядкой локализованных состояний. *Тонкошкур А. С., Иванченко А. В.* 5–6

Акустооптические свойства стекол  $Ge_xS_{100-x}$  и акустооптический модулятор на их основе. *Блецкан Д. И., Вакульчак В. В., Феделеш В. И.* 5–6

### Обеспечение тепловых режимов

Коаксиальная тепловая труба для охлаждения отражателя лазера. *Гершуни А. Н., Нищик А. П.* 2–3

Физическое представление и расчет начала кипения в пульсационной тепловой трубе. *Наумова А. Н., Кравец В. Ю., Николаенко Ю. Е.* 2–3

Исследование рабочих характеристик тепловых труб для светодиодных осветительных приборов. *Лозовой М. А., Николаенко Ю. Е., Рассамкин Б. М., Хайрнатов С. М.*

5–6

**Технологические процессы и оборудование**

Разработка процесса глубокого плазменного травления кремния для технологии трехмерной интеграции кристаллов. *Голишников А. А., Путря М. Г.*

1

Безадгезивные акустические мембраны на полиимидной основе. *Воробьев А. В., Жора В. Д., Баклаев К. К., Грунянская В. П.*

1

Получение соединений повышенной плотности термозвуковой микросваркой в 3D интегральных микросхемах. *Ланин В. Л., Петухов И. Б.*

2–3

Получение, свойства и применение тонких неоднородных пленок Ge на GaAs-подложках. *Венгер Е. Ф., Литвин П. М., Матвеева Л. А., Митин В. Ф., Холевчук В. В.*

4

Особенности трансформации примесно-дефектных комплексов в CdTe:Cl под воздействием СВЧ-облучения. *Будзуляк С. И., Корбутяк Д. В., Лоцько А. П., Вахняк Н. Д., Калитчук С. М., Демчина Л. А., Конакова Р. В., Шинкаренко В. В., Мельничук А. В.*

4

Влияние параметров ВЧ-разряда и параметров нагревателя на температуру подложки в плазмохимическом реакторе «Алмаз» для синтеза углеродных алмазоподобных пленок. *Гладковский В. В., Костин Е. Г., Полозов Б. П., Федорович О. А., Петряков В. А.*

5–6

**Материалы электроники**

Магнитные и кинетические свойства кристаллов  $Hg_{1-x-y}Cd_xDySe$ . *Ковалюк Т. Т., Майструк Э. В., Марьянчук П. Д.*

1

Физические свойства и зонная структура кристаллов  $(3HgTe)_{1-x}(Al_2Te_3)_x$ , легированных марганцем. *Марьянчук П. Д., Дымко Л. Н.,*

*Романишин Т. Р., Ковалюк Т. Т., Брус В. В., Солован М. Н., Мостовой А. И.*

2–3

Формирование резких границ раздела в эпитаксиальных структурах  $p^+-AlGaAs/n-GaAs$  методом МОС-гидридной эпитаксии. *Вакив Н. М., Круковский С. И., Ларкин С. Ю., Авксентьев А. Ю., Круковский Р. С.*

2–3

Гибкие фольгированные диэлектрики: классификация и анализ направлений применения и совершенствования. *Воробьев А. В., Жора В. Д.*

4

Ионизационный отжиг полупроводниковых кристаллов.

Часть первая: Теоретические предпосылки. Часть вторая: Эксперимент.

4  
5–6

*Гаркавенко А. С., Мокрицкий В. А., Банзак О. В., Завадский В. А.*

Элементы твердотельной электроники на основе КНИ-структур и нитевидных кристаллов Si для криогенных температур. *Дружинин А. А., Островский И. П., Ховерко Ю. Н., Корецкий Р. Н.*

5–6

Повышение радиационной устойчивости кремниевых монокристаллических эпитаксиальных слоев. *Курмашев Ш. Д., Кулинич О. А., Брусенская Г. И., Веремьева А. В.*

5–6

**Метрология. Стандартизация**

Исследование метрологических характеристик системы измерения малых изменений температуры. *Самынина М. Г., Шигимага В. А.*

1

Автоматизированная система определения глубины выгорания отработавшего ядерного топлива. *Мокрицкий В. А., Маслов О. В., Банзак О. В.*

5–6

**К истории науки и техники**

Всеукраинскому НИИ аналитического приборостроения «Укрналит» — 45 лет. *Дашковский А. А., Михеева И. Л.*

1

**Библиография**

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2013 г.

1

# Index of articles published in «Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature» («Technology and Design in Electronic Equipment») in 2014

## Electronic devices: research, development

Classification of methods for measuring current-voltage characteristics of semiconductor devices. *Iermolenko Ia. O.* 2–3

Rapid method to estimate temperature changes in electronics elements. *Oborskii G. A., Savel'eva O. S., Shikhireva Yu. V.* 2–3

Modeling of useful operating life of radioelectronics. *Nevlyudova V. V.* 4

Search for the optimal size of printed circuit boards for mechanical structures for electronic equipment. *Yefimenko A. A., Karlangach A. P., Lazarev S. N.* 5–6

## Microwave engineering

Compensation of parasitic elements of transistor in the class *F* amplifier with the tuning of impedances at harmonics. *Yefymovych A. P., Krizhanovski V. G.* 1

Microwave energy attenuators of high thermal conductivity based on AlN and SiC with addition of molybdenum. *Chasnyk V. I., Fesenko I. P.* 1

Inverse class *F* power amplifier using slot resonators as a harmonic filter. *Rassokhina Yu. V., Krizhanovski V. G., Kovalenko V. A., Colantonio P., Giofre R.* 2–3

Two-channel microwave power switch construction on the basis of electrically active semiconductor structures. *Lavrich Yu. N., Plaksin S. V., Kris V. Ya., Pogorelaya L. M., Sokolovskiy I. I.* 2–3

Microwave energy attenuators on the basis of aluminum nitride with high level of microwave energy absorption. *Chasnyk V. I.* 4

## Signals transfer and processing systems

The invariance of current energy Fourier spectrum of discrete real signals on finite intervals. *Ponomarev V. A., Ponomareva O. V.* 1

Local trajectory parameters estimation and detection of moving targets in Rayleigh noise. *Prokopenko I. G., Vovk V. Iu., Omelchuk I. P., Chirka Yu. D., Prokopenko K. I.* (in English) 1

Data transmission system with encryption by chaotic sequences. *Politans'kyi R. L., Shpatar P. M., Hres A. V., Verigha A. D.* 2–3

Coder and decoder of fractal signals of comb-type structure. *Politanskyi R. L., Veryga A. D.* 4

New pulse modulator with low switching frequency. *Golub V. S.* 5–6

## Power electronics

Circuitry of power supplies for pulsed arc welding with chaotic current oscillations. *Sidorets V. N., Bushma A. I., Zhernosekov A. M.* 2–3

The hybrid energy storages based on batteries and ultracapacitors for contact microwelding. *Bondarenko Yu. V., Safronov P. S., Bondarenko O. F., Sydorets V. M., Rogozina T. S.* 4

## Sensors

Generating three-parameter sensor. *Filinyuk M. A., Lishchinska L. B., Lazarev O. O., Tkachuk Y. S.* 4

## Biomedical electronics

Thermoelectric power source for electronic medical thermometer. *Anatychuk L. I., Kobylianskyi R. R., Konstantinovich I. A.* 4

## Functional micro- and nanoelectronics

Kinetics deformation of current-voltage characteristics of the varistor oxide structures due to overcharging of the localized states. *Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V.* 5–6

Acousto-optic properties of  $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$  glasses and acousto-optic modulator on their basis. *Bletska D. I., Vakulchak V. V., Fedelesh V. I.* 5–6

## Thermal management

Coaxial heat pipe for cooling of a laser's reflector. *Gershuni A. N., Nishchik A. P.* 2–3

Physical concept and calculation of boiling point in a pulsating heat pipe. *Naumova A. N., Kravets V. Yu., Nikolaenko Yu. E.* 2–3

Research on thermal characteristics of heat pipes for led lightning devices. *Lozovoi M. A., Nikolaenko Yu. E., Rassamakin B. M., Khairnasov C. M.* 5–6

### Production technology and equipment

Development of deep silicon plasma etching for 3D integration technology. *Golishnikov A. A., Putrya M. G.*

1

Nonadhesive acoustic membranes based on polyimide. *Vorob'ev A. V., Zhora V. D., Baklaev K. K., Grun'yanskaya V. P.*

1

Obtaining raised density connections by thermosonic microwelding in 3D integrated microcircuits. *Lanin V. L., Petuhov I. B.*

2–3

Fabrication, properties and application of Ge-on-GaAs thin nanoheterogeneous films. *Venger E. F., Lytvyn P. M., Matveeva L. A., Mitin V. F., Kholevchuk V. V.*

4

Features of transformation of impurity-defect complexes in CdTe:Cl under the influence of microwave radiation. *Budzulyak S. I., Korbutyak D. V., Lots'ko A. P., Vakhnyak N. D., Kalitchuk S. M., Demchina L. A., Konakova R. V., Shinkarenko V. V., Mel'nichuk A. V.*

4

The influence of if discharge parameters and heater settings on the substrate temperature in the plasma-chemical reactor «Almaz» for the synthesis of diamond-like carbon films. *Hladkovskiy V. V., Kostin E. G., Polozov B. P., Fedorovich O. A., Petriakov V. A.*

5–6

### Materials of electronics

Magnetic and kinetic properties of crystals  $Hg_{1-x-y}Cd_xDy_ySe$ . *Kovalyuk T. T., Mastruk E. V., Maryanchuk P. D.*

1

Physical properties and band structure of crystals  $(3HgTe)_{1-x}(Al_2Te_3)_x$ , doped with manganese. *Maryanchuk P. D., Dymko L. N., Romanishyn T. R., Kovalyuk T. T., Brus V. V., Solovan M. N., Mostovoy A. I.*

2–3

Sharp interfaces in  $p^+$ -AlGaAs/n-GaAs epitaxial structures obtained by MOCVD. *Vakiv N. M., Krukovskii S. I., Larkin S. Yu., Avksent'ev A. Yu., Krukovskii R. S.*

2–3

Flexible foiled dielectrics: classification and analysis of ways for application and improvement. *Vorobyev A. V., Zhora V. D.*

4

Ionization annealing of semiconductor crystals.

Part one: Theoretical background.

4

Part two: The experiment.

5–6

*Garkavenko A. S., Mokritskii V. A., Banzak O. V., Zavadskii V. A.*

Elements of solid state electronics based on SOI-structures and Si whiskers for cryogenic temperatures. *Druzhinin A. A., Osrovskkii I. P., Khoverko Yu. M., Koretskyy R. N.*

5–6

Increasing the radiation resistance of single-crystal silicon epitaxial layers. *Kurmashev Sh. D., Kulinich O. A., Brusenskaya G. I., Verem'eva A. V.*

5–6

### Metrology. Standartization

Investigation of metrological parameters of measuring system for small temperature changes. *Samynina M. G., Shigimaga V. A.*

1

Automated system for determining the burnup of spent nuclear fuel. *Mokritskii V. A., Maslov O. V., Banzak O. V.*

5–6

### On the history of science and engineering

All-ukrainian research and design institute of analytical instrumentation "Ukranalyt" celebrates its 45<sup>th</sup> anniversary. *Dashkovsky A. A., Mikhejeva I. L. (1)*

1

### Bibliography

Index of articles published in the journal in 2013

1

## РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

- Ащеулов Анатолий Анатольевич*, докт. техн. наук, профессор, Буковинский государственный финансовый экономический университет, г. Черновцы
- Анохин Игорь Евгеньевич*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт ядерных исследований НАНУ, г. Киев
- Баранов Валентин Владимирович*, докт. техн. наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск
- Болтовец Николай Силович*, канд. физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе, НИИ «Орион», г. Киев
- Бондаренко Александр Федорович*, канд. тех. наук, докторант, НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев
- Бондаренко Олег Владимирович*, докт. техн. наук, зав. кафедрой, профессор, Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова
- Босый Виталий Исаевич*, канд. тех. наук, директор ДП «Сатурн-Микро» НПП «Сатурн», г. Киев
- Вихор Людмила Николаевна*, докт. физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, г. Черновцы
- Глушеченко Эдуард Николаевич*, канд. техн. наук, начальник отдела, НПП «Сатурн», г. Киев
- Должиков Владимир Васильевич*, докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой, Харьковский национальный университет радиоэлектроники
- Каримов Абдулазиз Вахитович*, докт. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз, г. Ташкент
- Корбутяк Дмитрий Васильевич*, докт. физ.-мат. наук, профессор, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев
- Круковский Семен Иванович*, докт. техн. наук, нач. сектора, НПП «Карат», г. Львов
- Перевертайло Владимир Леонтьевич*, канд. физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе, НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАНУ, г. Киев
- Ситников Валерий Степанович*, докт. техн. наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет
- Смольский Сергей Михайлович*, докт. техн. наук, профессор, заместитель директора по международным связям Институт радиотехники и электроники МЭИ, г. Москва
- Трофимов Владимир Евгеньевич*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Цибрий Зиновия Федоровна*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев

## 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 непосредственно в тексте статьи;

— желательно избегать ссылок на труднодоступные или недолговечные 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. Тематическую информацию (название, ФИО авторов, место работы, аннотацию и ключевые слова) для русскоязычной статьи нужно привести на украинском (по возможности) и английском языках в конце статьи. При этом англоязычная аннотация должна быть представлена в расширенном виде (до 250 слов) и отражать все структурные элементы статьи (актуальность темы, постановку задачи, описание решения, выводы и практическую значимость).

Для статей на английском языке приводится краткая аннотация (50 — 100 слов), а также перевод тематической информации на русский и украинский (по возможности).

11. Редакция не предъявляет жестких требований к объему статьи — главное, чтобы он был оправдан.

12. 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.

13. 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.

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

15. Материалы статьи, вместе с подписанным Авторским соглашением и информацией об авторе (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).



# ЭНЕРГИЯ 2015

11-я специализированная выставка  
энергоэффективных решений  
08—10 сентября 2015

## Тематические разделы:

- Электроэнергетика
- Тепловая энергетика
- Электротехническое оборудование
- Контрольно-измерительные приборы и автоматика
- Промышленная автоматизация
- Кабельно-проводниковая продукция
- Электронные компоненты и системы
- Промышленное освещение
- Системы жизнеобеспечения промышленных объектов и жилья
- Энергосберегающие технологии
- Инновационные и инвестиционные проекты в энергетике

КОЗАК  
ПАЛАЦ

Выставочный центр: Козак Палац  
Украина, г. Запорожье, ул. Победы, 70  
Телефон: +38 (061) 213 50 26  
<http://expo.ua.all.biz/energiya-expo36>  
Организатор: Запорожская ТПП

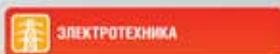


21 — 24 апреля 2015 г.  
МЕЖДУНАРОДНЫЕ ВЫСТАВКИ

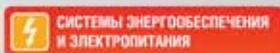


[www.elcom.ua](http://www.elcom.ua)

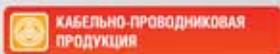
**Тематические направления**



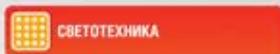
Высоковольтная аппаратура, низковольтная аппаратура, энергосбережение, охрана труда в электроэнергетике.



Когенерационные установки, электростанции, стабилизаторы, преобразователи, инверторы, выпрямители, аккумуляторы, источники бесперебойного питания, электрощитовое оборудование, системы электропитания, электроприборы и преобразователи, системы заземления и молниезащиты.



Кабели, провода, кабеленесущие системы, электромонтажные изделия, оборудование для монтажа и прокладки.



Техническое освещение, декоративное освещение, LED-освещение, источники света.

[www.asutp.euroindex.ua](http://www.asutp.euroindex.ua)



**Тематические направления**

**Электроника**

микропроцессоры и микроконтроллеры, активные компоненты, пассивные компоненты, силовая электроника, источники питания, датчики, ВЧ- и СВЧ-компоненты, дисплеи и светодиодная продукция, печатные платы и контрактное производство, полупроводниковые компоненты и устройства, электромеханические компоненты и технологии соединений

**Промышленная автоматизация**

АСУП, АСУ ТП, АСДУ, АСКУЭ, АСПР, Системы контроля технологических параметров, САПР, SCADA-системы, MES-системы, промышленное программное обеспечение, промышленные компьютеры, интеграция и консалтинг

**Контрольно-измерительные приборы**

электроизмерительные приборы, радиоизмерительные приборы, генераторы сигналов, приборы контроля и управления, измерители, преобразователи, средства контроля технических параметров, метрологическое оборудование, делители, датчики, автоматика, блоки питания, уровнемеры, расходомеры

*Номер готовили  
Киев, Львов, Минск, Москва, Одесса,  
Ташкент, Харьков, Черновцы*



Пишите  
Подписывайтесь  
Читайте