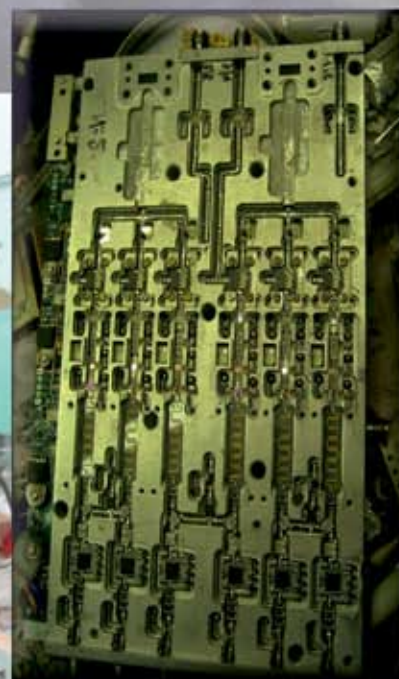
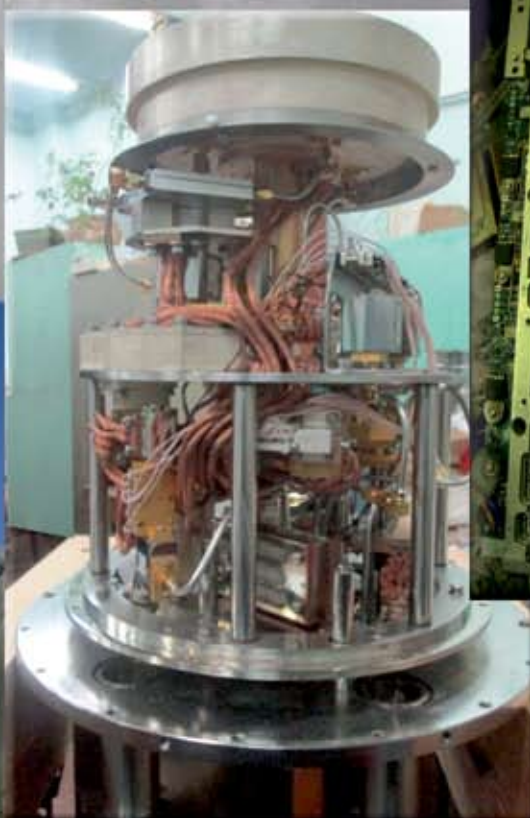


ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



К статье
«Особенности
конструктивно-технологических
решений приемной системы малых
радиотелескопов»

2—3 2016

МАРТ — ИЮНЬ

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

ISSN 2225-5818

Регистрационный номер КВ 21788-11688ПР

Выходит один раз в 2 месяца

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

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев)

Включен в международную справочную систему по периодическим и продолжающимся изданиям

"Ulrich's Periodicals Directory" (США),

в международную систему библиографических ссылок CrossRef,

в наукометрическую базу РИНЦ научной электронной библиотеки России,

в базу данных DOAJ, в Google Scholar

Номер выпущен при поддержке

НПП «Сатурн», (г. Киев),

НПП «Карат» (г. Львов),

ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

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

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, web-сайт: www.tkea.com.ua,

тел. +38 (048)728-18-50, 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.

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2016 № 2–3

Год издания 40-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. Антошук (г. Одесса)

д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)

д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)

д.т.н. А. П. Бондарев (г. Львов)

*К.т.н. Э. Н. Глушеченко (г. Киев),
зам. главного редактора*

д.ф.-м.н. В. В. Должиков (г. Харьков)

К.т.н. И. Н. Еримичой (г. Одесса)

*д.т.н. А. А. Ефименко (г. Одесса),
зам. главного редактора*

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)

Чл.-корр. НАНУ,

д.ф.-м.н. В. С. Лысенко (г. Киев)

К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)

д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)

д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)

*д.ф.-м.н. С. В. Плаксин
(г. Днепропетровск)*

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)

*К.т.н. П. С. Сафронов (г. Одесса),
отв. секретарь редколлегии*

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

Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарева

Научно-производственное

предприятие «Сатурн»

Одесский национальный

политехнический университет

Издательство «Политехпериодика»

Одобрено к печати

Ученым советом ОНПУ

(Протокол № 7 от 30.05 2016 г.)

Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

Новые технологии

Радиационно стойкая фотоструктура на основе $\text{Cr/In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ для диода Шоттки. *А. А. Ащеулов, А. В. Галочкин, И. С. Романюк, С. Г. Дремлюженко*

3

Электронные средства: исследования, разработки

Расчет упругих элементов в конструкциях электрических соединителей на основе гибких печатных кабелей. *А. А. Ефименко, С. В. Мерлян*

8

Проектирование многозондовых устройств для тестирования электронных компонентов с шариковыми выводами. *И. Ш. Невлюдов, В. А. Палагин, Е. А. Разумов-Фризюк, И. В. Жарикова*

15

СВЧ-техника

Особенности конструктивно-технологических решений приемной системы малых радиотелескопов. *Э. Н. Глушеченко, А. М. Пилипенко, Э. В. Слонин, И. К. Сундучков, В. В. Чмиль*

21

Системы передачи и обработки сигналов

Рекуррентные алгоритмы настройки адаптивных решетчатых фильтров. *Д. И. Леховицкий, В. П. Рябуха, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка*

26

Эффективность методов синтеза последовательностей со свойством «не более одного совпадения». *А. И. Неврев, О. Н. Галчёнков*

33

Материалы электроники

Высокотемпературная люминесценция кристаллов ZnSe:Yb . *В. П. Махний, О. В. Кинзерская, И. М. Сенко, А. М. Слётов*

37

Синтез и исследование нанопорошков ферромолибдата стронция с высокой степенью сверхструктурного упорядочения для спинтроники. *М. В. Ярмолич, Н. А. Каланда, С. Е. Демьянов, М. В. Силибин, Г. Г. Горох*

41

Влияние самоинтеркаляции меди на термоэлектрические свойства легированных кристаллов $\text{Bi}_2\text{Te}_3<\text{Cu}>$ в процессе их хранения. *А. П. Алиева, С. Ш. Кахраманов, А. Ш. Кахраманов*

49

К истории науки и техники

Роль личности в научном прогрессе (к 80-летию со дня рождения Л. Г. Гассанова) *Э. Н. Глушеченко, Т. Н. Нарытник*

53

Список рецензентов номера

56

Новые книги

36, 40, 52

ЗМІСТ

Нові технології

Радіаційно стійка фотоструктура на основі Cr/In₂Hg₃Te₆ для діода Шотткі. А. А. Ащеулов, О. В. Галочкін, І. С. Романюк, С. Г. Дремлюженко (3)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Розрахунок пружних елементів у конструкціях електричних з'єднувачів на основі гнучких друкованих кабелів. А. А. Єфименко, С. В. Мерлян (8)

Проектування багатозондових пристроїв для тестування електронних компонентів з кульковими виводами І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін, Є. А. Разумов-Фризюк, І. В. Жарікова (15)

НВЧ-техніка

Особливості конструктивно-технологічних рішень приймальної системи малих радіотелескопів. Е. М. Глушеченко, О. М. Пилипенко, Е. В. Слонін, І. К. Сундучков, В. В. Чміль (21)

Системи передачі та обробки сигналів

Рекурентні алгоритми налаштування адаптивних решітчастих фільтрів. Д. І. Леховицький, В. П. Рябуха, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка (26)

Ефективність методів синтезу послідовностей з властивістю «не більше одного збігу». О. І. Неврев, О. М. Галчонков (33)

Матеріали електроніки

Високотемпературна люмінесценція кристалів ZnSe:Yb. В. П. Махній, О. В. Кінзерська, І. М. Сенко, О. М. Сльотов (37)

Синтез та дослідження нанопорошків ферромолібдату стронцію з високим ступенем сверхструктурного упорядкування для спинтроніки. М. В. Ярмоліч, Н. А. Каланда, С. Є. Дем'янов, М. В. Сілібін, Г. Г. Горох (41)

Вплив самоінтеркаляції міді на термоелектричні властивості легованих кристалів Bi₂Te₃<Cu> під час їх зберігання. А. П. Алієва, С. Ш. Кахраманов, А. Ш. Кахраманов (49)

До історії науки та техніки

Роль особистості у науковому прогресі (до 80-річчя від дня народження Л. Г. Гассанова). Е. М. Глушеченко, Т. М. Наритник (53)

CONTENTS

Modern electronic technologies

Radiation-resistant photostructure for schottky diode based on Cr/In₂Hg₃Te₆. A. A. Ashcheulov, A. V. Galochkin, I. S. Romanyuk, S. G. Dremlyuzhenko (3)

Electronic devices: research, development

An elastic elements calculation in the construction of electrical connectors based on flexible printed cables. A. A. Yefimenko, S. V. Merlyan (8)

Design of multiprobe devices for electronic components with ball leads testing. I. Sh. Nevlyudov, V. A. Palagin, E. A. Razumov-Frizyuk, I. V. Zharikova (15)

Microwave engineering

Features of structural and technological solutions for receiving system of small radio telescopes. E. N. Glushechenko, A. M. Pylypenko, E. V. Slonin, I. K. Sunduchkov, V. V. Chmil (21)

Signals transfer and processing systems

Recursive algorithms of adaptive lattice filters adjustment. D. I. Lekhovyt'skiy, V. P. Riabukha, D. S. Rachkov, A. V. Semeniaka (26)

Efficiency of sequence synthesis methods with the "not more than one match" property. A. I. Nevrev, O. N. Galchenkov (33)

Materials of electronics

High temperature luminescence of ZnSe:Yb crystals. V. P. Makhniy, O. V. Kinzerska, I. M. Senko, O. M. Slyotov (37)

Synthesis and study of strontium ferromolybdate nanopowders with high degree of superstructural ordering for promising spintronics devices. M. V. Yarmolich, N. A. Kalanda, S. E. Dem'yanov, M. V. Silibin, G. G. Gorokh (41)

Influence of copper intercalation on thermoelectric properties change in Bi₂Te₃<Cu> doped crystals during storage. A. P. Aliyeva, S. Sh. Gahramanov, A. Sh. Gahramanov (49)

On the history of science and engineering

Role of personality in scientific advancement (dedicated to the eightieth anniversary of the birth of Lev G. Gassanov) Ye. M. Glushechenko, T. N. Narytnik (53)

Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ¹, А. В. ГАЛОЧКИН¹, к. т. н. И. С. РОМАНЮК²,
к. х. н. С. Г. ДРЕМЛЮЖЕНКО³

Украина, г. Черновцы, ¹Буковинский государственный финансово-экономический университет,

²Завод «Кварц», ³ЧНУ имени Юрия Федьковича

E-mail: ashcheulovaa@rambler.ru

РАДИАЦИОННО СТОЙКАЯ ФОТОСТРУКТУРА НА ОСНОВЕ Cr/In₂Hg₃Te₆ ДЛЯ ДИОДА ШОТТКИ

Представлены конструкция и технология изготовления структуры фотодиода Шоттки на основе подложки из радиационно-стойкого кристалла n-In₂Hg₃Te₆ с барьерным слоем из Cr, характеризующегося фотоотчетом в области 0,6–1,6 мкм при максимальной чувствительности 0,43 А/Вт на длине волны 1,55 мкм. Исследования электрических параметров этих фотодиодных структур показали, что высота потенциального барьера составляет 0,41 эВ, а величина обратного темнового тока не превышает 4 мкА. Созданные устройства сохраняют свою работоспособность при дозах гамма-облучения 2·10⁸ бэр.

Ключевые слова: фотодиод Шоттки, радиационная стойкость, In₂Hg₃Te₆, Cr.

В настоящее время весьма актуальны различные оптические системы обработки информации, в том числе и со спектральным рабочим диапазоном, расположенным в области прозрачности кварцевого стекловолокна [1]. В качестве приемников излучения в этом случае используются фотодиоды на основе Ge, Si, InGaAs, GaInAsP и др. [2, 3]. В случае оптических систем, функционирующих в условиях повышенной радиации, оптимальным оказалось использование фотоприемных устройств на основе кристаллов In₂Hg₃Te₆ [4]. С одной стороны, это вызвано тем, что данный полупроводник характеризуется фоточувствительностью в спектральном диапазоне 0,5–1,6 мкм [5], с другой — его повышенной радиационной стойкостью к α-, β- и γ-излучениям [6], обусловленной наличием в его кристаллической структуре электрически нейтральных катионных вакансий [7].

Анализ электрических и фотоэлектрических параметров существующих фотодиодов Шоттки (ФДШ) [8–10], а также результаты исследований их радиационной стойкости [11] показали, что относительно равномерным спектральным распределением фоточувствительности S характеризуются фотоструктуры на основе ИТО/In₂Hg₃Te₆ и Au/In₂Hg₃Te₆ ($S=0,48–0,76$ А/Вт), а наиболее высокой радиационной стойкостью обладают фотоструктуры на основе Ni/In₂Hg₃Te₆ — доза облучения D , при которой они сохраняют работоспособность, составляет примерно $8 \cdot 10^7$ бэр. Дальнейшее увеличение D приводит к снижению чувствительности

этой структуры вследствие отслаивания барьерного слоя из Ni.

Анализ характера и вида разрушений, возникающих в конструкции существующих ФДШ под воздействием гамма-излучения, показал, что в основном они определяются процессами аморфизации материалов барьерного и омического слоев [11], которые приводят к ухудшению адгезии и, как следствие, к разрушению электрических контактов между монокристаллической подложкой из In₂Hg₃Te₆ и этими слоями. Следует отметить, что при этом не наблюдается заметного изменения электрофизических свойств подложки.

Обзор литературы по материалам, используемым в качестве радиационно стойких барьерных слоев, показал, что с точки зрения оптических, электрических, химических и адгезионных свойств, а также радиационной стойкости оптимальным в этом случае является слой из Cr [12, 13].

Целью настоящей работы является разработка и исследование ФДШ-структур на основе In₂Hg₃Te₆ с барьерным слоем из Cr, характеризующихся повышенной радиационной стойкостью.

Особенности ФДШ на основе Cr/In₂Hg₃Te₆

Структура предлагаемого ФДШ (рис. 1) представляет собой монокристаллическую подложку из монокристалла n-In₂Hg₃Te₆, выращенного модифицированным методом зонной перекристаллизации [14], в котором нивелирован эффект седиментации исходных материалов [15]. Радиационно стойкие монокристаллы, получаемые этим методом, характеризуются повышенной однородностью физических параметров как в поперечном направлении, так и в продольном

Авторы выражают благодарность к. т. н. Ю. Г. Добровольскому за помощь и полезные замечания.

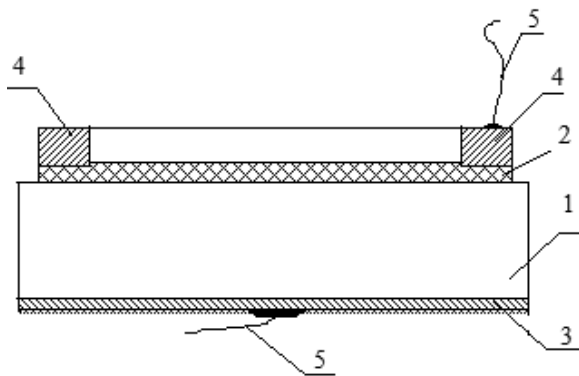


Рис. 1. Структура ФДШ на основе Сг/In₂Hg₃Te₆: 1 — подложка из n-In₂Hg₃Te₆; 2 — барьерный слой Сг; 3 — омический контакт из In; 4 — переходной слой нихрома; 5 — электровыводы из нихрома

[14]. Их использование позволяет значительно уменьшить обратный темновой ток ФДШ [16], величина которого зависит от неоднородности кристалла, из которого изготовлена подложка.

Разрезание выращенных монокристаллов на образцы требуемой конфигурации и размеров проводилась вольфрамовой струной с подачей водной суспензии абразива АМ10; механическая шлифовка — свободными абразивами М10, М5; механическая полировка — алмазными пастами АСМ с зернами разных размеров. Финишная обработка проводилась двумя способами: химическое травление в 8%-м растворе брома в метаноле (травитель 1); химико-механическая полировка в растворе, в состав которого входили аминоэтоксисаэросил, H₂O₂, NaOH, C₃H₈O₃ (травитель 2).

Верхняя фронтальная грань подложки обрабатывалась лазерным излучением с помощью установки ГОР-100М, благодаря чему удалялся нарушенный вследствие механической обработки поверхностный слой. Далее проводился отжиг в парах ртути при температуре $T=460-490$ К на протяжении 700 ч. Концентрация собственных носителей электрического заряда материала подложки размерами 2×2 мм составляла $n = 10^{11}-10^{13}$ см⁻³, а их подвижность $\mu = 275-300$ см²/(В·с).

Поверхность верхней грани подложки 1 содержит слой Сг 2 (в форме круга диаметром 1,2 мм), нанесенного методом катодного напыления на установке УВН-71ПЗ с использованием молибденовой маски соответствующей формы и размеров. При этом температура подложки поддерживалась на уровне 380—400 К, а напыление навески Сг проводилось со средней скоростью 0,7 нм/с. Толщина барьерного слоя Сг определялась из условия максимального оптического пропускания и составляла 10—11 нм [17].

Исследование морфологии поверхности, а также структуры напыленной пленки Сг проводилось с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-100У методом «вторичных электронов» и сканированием в рентгеновских лу-

чах. Результаты показали, что поверхностный слой является однородным и характеризуется поликристаллической структурой.

Далее на слой Сг через соответствующую молибденовую маску методом термического напыления наносился переходной слой нихрома 4 толщиной 1,5—2 мкм в форме кольца с разрезом. Для повышения адгезии и оптической прозрачности системы «подложка — барьерный слой», а также увеличения временной стабильности электрических, фотоэлектрических и оптических характеристик, подложка вместе с нанесенными слоями отжигалась с помощью СО₂-лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) со стороны нижней грани подложки, являющейся прозрачной для такого излучения. После этого на нижнюю грань подложки также методом термического напыления наносился омический In-контакт 3. Нихромовый электровывод 5 крепился к слою нихрома 4 методом импульсной электросварки.

Исследование параметров ФДШ

Исследования основных параметров ФДШ, таких как спектральная зависимость чувствительности, ее максимальное значение, обратный темновой ток, определялись по стандартным методам [18].

Анализ полученных результатов показал, что созданные структуры чувствительны к излучению в диапазоне 600—1600 нм (при интегральной дозе облучения $D = 0$), при этом максимальное значение чувствительности (0,43 А/Вт) приходится на длину волны 1550 нм (рис. 2).

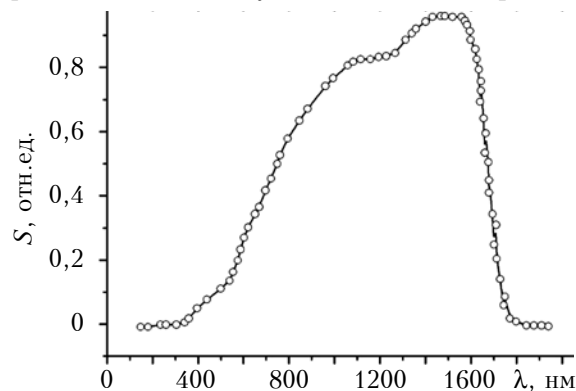


Рис. 2. Спектральная зависимость чувствительности структуры Сг/In₂Hg₃Te₆

Анализ приведенных на рис. 3 вольт-амперных характеристик этих структур указывает на то, что экспоненциальная зависимость протекания прямого тока подчиняется классическому выражению Шокли

$$I = I_S \left(\exp \frac{qU}{nkT} - 1 \right),$$

где I_S — ток насыщения, $I_S = APT \exp \phi / (kT)$;

A — константа Ричардсона;

P — площадь барьерного перехода;

ϕ_b — высота потенциального барьера.

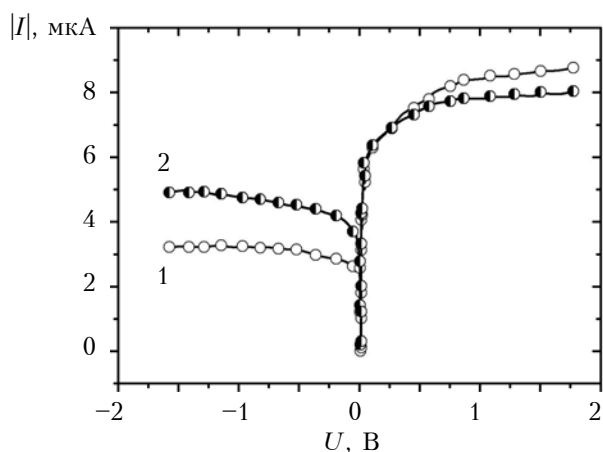


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики необлученной структуры $\text{Cr}/\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ (1) и при облучении дозой $2 \cdot 10^8$ бэр (2)

При этом значение темнового тока находится в диапазоне 1–4 мкА при обратном смещении 1 В. Экстраполяция полулогарифмической зависимости $\ln I = f(U)$ позволила определить величину тока насыщения, а также ϕ_b , которое составило 0,41 эВ (при $A = 120$ и $P = 0,25\pi d^2 = 1,13 \text{ мм}^2$). Поскольку ширина запрещенной зоны $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ составляет 0,7 эВ, а высота потенциального барьера ФДШ почти вдвое меньше, то можно утверждать о том, что контакт «металл – полупроводник» созданного устройства качественный.

Испытания радиационной стойкости партии созданных структур проводились на стандартных установках, содержащих изотоп Co-60 , а в случае бета-излучения – на установке ГВГ-11А. Ухудшения параметров ФДШ практически не наблюдалось в первом случае при $D = 10^7$ – $2 \cdot 10^8$ бэр и при $D = 10^7$ бэр во втором. При увеличении же интегральной дозы гамма-облучения до $5 \cdot 10^8$ бэр максимальная спектральная чувствительность падала до значения 0,38 А/Вт, а обратный темновой ток возрастал до 5–6 мкА. Следует отметить, что при аналогичных дозах радиации стандартные ФДШ на основе Si полностью теряют свою работоспособность [11].

Предварительные исследования, проведенные методом «на отражение» с помощью электронографа ЭГ-100А на соответственно подготовленных пластинах $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ с нанесенным слоем In, показали, что изменения параметров облученных устройств вызваны, в первую очередь, аморфизацией нижнего омического In-контакта, которая происходит из-за радиационного разрушения низкоэнергетических неэквивалентных орбиталей, составляющих тонкую структуру химических связей In [19]. При этом результаты измерения электрических параметров подложки

не показали существенного изменения ее удельного сопротивления.

Выводы

Таким образом, созданные фотоструктуры диодов Шоттки на основе монокристаллической подложки $n\text{-In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ с барьерным слоем из Cr обладают спектральной чувствительностью в диапазоне 0,6–1,6 мкм с максимумом 0,43 А/Вт на длине волны 1,55 мкм. При комнатной температуре обратный темновой ток такого ФДШ не превышает 4 мкА при смещении 1 В. Данное устройство выдерживает радиационные потоки до $2 \cdot 10^8$ бэр, что позволяет рекомендовать эти фотоструктуры для практического применения. При этом в случае использования новых радиационно стойких контактных материалов следует ожидать дальнейшее повышение их радиационной стойкости.

Данные структуры рекомендуются к использованию в различных приборах, устройствах и системах, предназначенных для регистрации излучения видимой и ближней части ИК-спектра оптического диапазона, функционирующих при повышенных дозах гамма-радиации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Каток В.Б., Короп Б.В., Никитченко Ю.Б., Руденко И.Е. Волоконно-оптические системы передачи. – Москва: Ирис, 1994.
2. Абдулхаев О.А., Едгорова Д.М., Каримов А.В., Кулиев Ш.М. Высокочувствительный фотоприемник на основе германиевой двухбарьерной структуры с эффектом смыкания // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. – № 4. – С. 24–26. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.4.24>
3. Бараночников М.Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник. – Москва: ДМК Пресс, 2012.
4. Домашевская Э.П., Неврюева Е.Н., Грушка Г.Г. и др. Влияние стехиометрических вакансий на поведение потолка валентной зоны в твердых растворах $(\text{In}_2\text{Te}_3)_x-(\text{Hg}_3\text{Te}_3)_{1-x}$ // ФТП. – 1991. – Т. 25, вып. 5. – С. 893–897.
5. Малик А.И., Грушка Г.Г. Самокалиброванный измерительный ИК фотодиод на основе дефектного полупроводника $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ для спектрального диапазона 0,85–1,5 мкм // ЖТФ. – 1990. – № 10. – Р. 188–190.
6. Грушка Г.Г., Грушка З.М., Гавалешко Н.П. Электрические свойства собственного полупроводника $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ // УФЖ. – 1985. – Т. 30, № 2. – С. 304–307.
7. Диэлектрики и полупроводники в детекторах излучения / Под. ред. Ю.В. Малюкина. – Харьков: Институт монокристаллов, 2006.
8. Косяченко Л.А., Паранчик С.Ю., Макогоненко В.Н. и др. Электрические свойства поверхностно-барьерной фотодиодной структуры на основе HgInTe // ЖТФ. – 2003. – Т. 73, № 5. – С. 126–129.
9. Косяченко Л.А., Паренко И.М., Склярчук Е.Ф., Герман И.И., Sun Weiguo. Электрические характеристики фотодиодов ITO/HgInTe // ФТП. – 2006. – Т. 40, № 5. – С. 568–571.

10. Склярчук В.М., Захарук З.І., Рибак Є.В. та ін. Електрофізичні властивості діодів Шотткі $\text{Ni-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ // XI Міжнар. конф. з фізики і технології тонких плівок. — Україна, Івано-Франківськ. — 2007. — С. 182.
11. Ковальчук М.Л. Дослідження твердих розчинів на основі HgTe як базових для фотоприймачів широкого спектрального діапазону електромагнітного випромінювання / Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — ЧНУ ім. Ю.Федьковича. — 2009.
12. Кочубей В.А., Атучин В.В., Покровский Л.Д. и др. Структура, микрорельеф и оптические свойства пленок хрома, полученных методом сублимации в вакууме // Письма о материалах. — 2013. — Т. 3, № 4. — С. 326–329.
13. Kulkarni A.K., Chang L.C. Electrical and structural characteristics of chromium thin films deposited on glass and alumina substrates // Thin Solid Films. — 1997. — Vol. 301, iss. 1-2. — P.17–22.
14. Пат. 105367 України. Процес отримання монокристалів $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ / Галочкін О.В. и др. — 2016. — Бюл. № 5.
15. Галочкін О.В., Годованюк В.М., Захарук З.І. та ін. Вплив гравітаційної седиментації в розплавах багатокомпонентних напівпровідників на процеси вирощування кристалів спрямованою кристалізацією, зонною плавкою // Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ. — 2010. — № 1. — С. 10–15.
16. Галочкін О.В., Ащеулов А.А., Дремлюженко С.Г. Координатно-чутливий фотодіод Шотткі на $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ // Конф. молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарівські читання 2016». — Україна, Київ. — 2016. — С. 52.
17. Андреев В.Г., Ангелуц А.А., Вдовин В.А., Лукичев В.Ф. Спектральные характеристики пленок хрома нанометровой толщины в терагерцовом диапазоне частот // Письма в ЖТФ. — 2015. — Т.41, №4. — С. 52–60.
18. Докторович И.В., Бутенко, В.К., Годованюк, В.Н., Юрьев, В.Г. Методика определения динамического диапазона полупроводниковых фотоприемников // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. — 2002. — № 6. — С. 14–15.
19. Ащеулов А. А., Маник О. Н., Маник Т. О., Билинский-Слотыло В. Р. Молекулярная модель и химическая связь теллура // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010. — №5–6. — С. 46–50.

Дата поступления рукописи
в редакцию 28.03 2016 г.

А. А. АЩЕУЛОВ¹, О. В. ГАЛОЧКИН¹, І. С. РОМАНЮК², С. Г. ДРЕМЛЮЖЕНКО³

Україна, Чернівці, ¹Буковинський державний фінансово-економічний університет,
²Завод «Кварц», ³ЧНУ імені Юрія Федьковича
Email: ashcheulovaa@rambler.ru

РАДІАЦІЙНО СТИЙКА ФОТОСТРУКТУРА НА ОСНОВІ $\text{Cr}/\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ ДЛЯ ДІОДА ШОТТКІ

Представлено конструкцію і технологію виготовлення структури фотодіода Шотткі на основі підкладки з радіаційно стійкого кристала $n\text{-In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ з бар'єрним шаром з Cr , що характеризується фотовідповіддю в області 0,6–1,6 мкм при максимальній чутливості 0,43 А/Вт на довжині хвилі 1,55 мкм. Дослідження електричних параметрів цих фотодіодних структур показали, що висота потенційного бар'єру складає 0,41 еВ, а величина зворотного темного струму не перевищує 4 мкА. Створені пристрої зберігають свою працездатність при дозах гамма-опромінення $2 \cdot 10^8$ бер.

Ключові слова: фотодіод Шотткі, радіаційна стійкість, $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$, Cr .

DOI: 10.15222/TKEA2016.2-3.03
UDC 621.383.526, 621.793

A. A. ASHCHEULOV¹, A. V. GALOCHKIN¹,
I. S. ROMANYUK², S. G. DREMLUZHENKO³

Ukraine, Chernivtsi, ¹Bukovina State University of Finance and Economy,
²Business Park «Quartz», ³Chernivtsi National University

RADIATION-RESISTANT PHOTOSTRUCTURE FOR SCHOTTKY DIODE BASED ON $\text{Cr}/\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$

Ge, Si, InGaAs, GaInAsP photodiodes are used as optical radiation receivers and function in a spectral range of transparency of quartz fiberglass. For the optical systems operated in the increased radioactivity the photodetectors' application on $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ crystal base characterized by a photosensitivity in the spectral range of 0,5–1,6 μm and also by increased radiation resistance to alpha, beta and gamma radiation is most acceptable.

Schottky photodiode structure was designed on the base of this semiconductor formed by a modified floating zone recrystallization technique where the sedimentation effect was leveled. It consists of $n\text{-In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$ substrate and deposited by cathode sputtering Cr barrier layer of thickness within a range 10–11 nm choice of Cr is determined by its optimal optical, electric and adhesive features in high quality radiation-resistant photodiode structures manufacturing. Indium and nichrome are used as ohmic contacts.

The barrier structures have the contact area of $1,13 \text{ mm}^2$ with photo response of $0,6-1,6 \text{ }\mu\text{m}$ at the maximal sensitivity $0,43 \text{ A/W}$ on the wavelength $1,55 \text{ }\mu\text{m}$. Reverse dark current of these structures do not exceed $4 \text{ }\mu\text{A}$ at the bias of 1 V ($T=295 \text{ K}$), and the potential barrier height is equal to $0,41 \text{ eV}$. The tests of radiation resistance of these structures demonstrated their ability to function at doses of $2 \cdot 10^8 \text{ rem}$ without evident parameters changes. This allows using them in practical aims in the conditions of high radiation.

Keywords: Schottky photodiode, radiation resistance, $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$, Cr.

REFERENCES

1. Katok V.B., Korop B.V., Nikitchenko Yu.B., Rudenko I.E. *Volokonno-opticheskie sistemy peredachi* [Fiber optic transmission system]. Moscow, Iris, 1994, 120 p. (Rus)
2. Abdulkhaev O. A., Yodgorova D. M., Karimov A. V., Kuliyeu S. M. [Highly sensitive photodetector based on Ge double-barrier punch-through structure]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2015, no 4, pp. 24-26. (Rus) <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.4.24>
3. Baranochnikov M.L. *Priemniki i detektory izlucheniya: Spravochnik* [Receivers and detectors of optical radiation: Handbook]. Moscow, DMK Press, 2012, 640 p. (Rus)
4. Domashevskaya E.P., Nevryueva E.N., Grushka G.G., Govareshko N.P., Bayev A.S., Terekhov V.A. [Influence of stoichiometric vacancies on the top of valence band in solid solutions $(\text{In}_2\text{Te}_3)_x-(\text{Hg}_3\text{Te}_3)_{1-x}$]. *FTP*, 1991, vol. 25, iss. 5. pp. 893-897. (Rus)
5. Malik A.I., Grushka G.G. [Self-calibrated radiometric IR photodiode based on defect semiconductor $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$ for the spectral range $0.85-1.5 \text{ }\mu\text{m}$]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1990, iss. 10, pp. 188-190. (Rus)
6. Grushka G.G., Grushka Z.M., Govareshko N.P. [Electrical properties of intrinsic semiconductor $\text{Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$]. *Ukrainian Journal of Physics*, 1985, vol. 30, no. 2, pp. 304-307. (Rus)
7. *Dielektriki i poluprovodniki v detektorakh izlucheniya* [Insulators and semiconductors in the detectors of radiation]. Ed. by Yu.V. Malyukina. Kharkov, Institute of Monocrystals, 2006, 360 p. (Rus)
8. Kosyachenko L. A., Paranchich Yu. S., Makogonenko V. N., Sklyarchuk V. M., Sklyarchuk E. F., German I. I. *Electrical performance of HgInTe surface-barrier photodiodes*. *Technical Physics*, 2003, vol. 48, no. 5, p. 647.
9. Kosyachenko L.A., Rarenko I.M., Sklyarchuk E.F., German I.I., Sun Weiguo. Electrical characteristics of ITO/ HgInTe photodiodes. *Semiconductors*, 2006, vol. 40, iss. 5, pp. 554-557. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782606050083>
10. Sklyarchuk V.M., Zakharuk Z.I., Rybak Ye.V., Rarenko I.M., Sklyarchuk O.F., German I.I. [Electrical properties of the Shottki diodes on $\text{Ni-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$]. *Proceed. of the XI Int. Conference Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems*, Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2007, p. 182. (Ukr)
11. Koval'chuk M.L. *Doslidzhennya tverdikh rozchiniv na osnovi HgTe yak bazovikh dlya fotopriimachiv shirokogo spektral'nogo diapazonu elektromagnitnogo viprominyuvannya*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Study solid solutions based on HgTe as base for the photodetectors wide spectral range of electromagnetic radiation. Dr. phys. and math. sci. diss.] Chernivtsi National University, Ukraine, 2009. (Ukr)
12. Kochubey V.A., Atuchin V.V., Pokrovsky L.D., Soldatenkov I.S., Troitskaia I.B., Kozhukhov A.S., Kruchinin V.N. [Structure, microrelief and optical properties of chromium films deposited by sublimation in vacuum]. *Letters on materials*, 2013, vol. 3, iss. 4, pp. 326-329. (Rus)
13. Kulkarni A.K., Chang L.C. Electrical and structural characteristics of chromium thin films deposited on glass and alumina substrates. *Thin Solid Films*, 1997, vol. 301, iss. 1-2, pp. 17-22.
14. Galochkin O.V. et. al. *Protses otrimannya monokristaliv $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$* [The process of obtaining single crystals $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$]. Patent UA, no. 105367, 2016.
15. Galochkin O.V., Godovanyuk V.M., Zakharuk Z.I., Kolisnyk M.G., Rarenko A.I., Rarenko I.M., Ruskovoloshyn M.M., Raranskiy M.D. [Influence of gravitational sedimentation in semiconductor melt on the crystal growth by direct crystalization, zone melting]. *Novi tekhnologiyi. Naukovii visnik KUEITU*, 2010, no. 1, pp. 10-15. (Ukr)
16. Galochkin O.V., Ashcheulov A.A., Dremlyuzhenko S.G. [Jig-sensitive photodiode on Schottky on $\text{In}_2\text{Hg}_3\text{Te}_6$]. *Conference of young scientists on semiconductor physics "Lashkaryov's readings 2016"*, Ukraine, Kyiv, p. 52. (Ukr)
17. Andreev V. G., Angeluts A. A., Vdovin V. A., Lukichev V. F. Spectral characteristics of nanometer-thick chromium films in terahertz frequency range. *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, iss. 2, pp. 180-183. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063785015020170>
18. Doctorovich I.V., Butenko V.K., Godovanyuk V.N., Yur'ev V.G. [Determination methodology of dynamic range of semiconductor photodetectors]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2002, no. 6, pp. 14-15. (Rus)
19. Ashcheulov A.A., Manyk O.N., Manyk T.O., Bilinsky-Slotylo V.R. [Molecular model and chemical bond of tellurium]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2010. no. 5-6, pp. 46-50. (Rus).

Д. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО, С. В. МЕРЛЯН

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: aiefimen@gmail.com, stasmerlyan@gmail.com

РАСЧЕТ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОНСТРУКЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ГИБКИХ ПЕЧАТНЫХ КАБЕЛЕЙ

Приведена методика определения конструктивных параметров элементов разъемных и неразъемных соединителей на основе гибкого печатного кабеля. Решена проблема перехода от единиц измерения твердости, указанных в технических условиях на резины, к величине модуля упругости, который используется при расчетах конструктивных параметров соединителей. Приведены примеры расчета величины сжатия эластомерного вкладыша, необходимой для обеспечения надежного контактирования, при заданной величине переходного сопротивления соединителя.

Ключевые слова: электрический соединитель, эластомерный вкладыш, переходное сопротивление, твердость, упругость, гибкий печатный кабель, усилие сочленения-расчленения.

Характерной особенностью электрических соединителей, в которых в качестве групповых контактов используются гибкие печатные кабели, является применение эластомерных вкладышей, выполняющих роль групповой пружины [1].

Как известно, в контактной паре электрических соединителей должно быть создано определенное давление, и чем оно больше, тем меньше переходное контактное сопротивление, а также надежнее и стабильнее контакт. Однако, с другой стороны, увеличение давления приводит к увеличению усилия сочленения-расчленения контактов, которое является важным эксплуатационным показателем соединителей. То есть очевидно, что при проектировании соединителей должно быть найдено оптимальное соотношение между величинами контактного сопротивления и давления, обеспечивающее надежный контакт при допустимом усилии сочленения-расчленения контактных пар. Для того чтобы это соотношение было реализовано в конструкции электрического соединителя, необходимо иметь метод расчета элементов конструкции, в частности упругих элементов, которыми являются эластомерные вкладыши. Методы расчетов для соединителей с дискретными металлическими контактами детально разработаны достаточно давно [2, 3], в отличие от соединителей на основе гибких печатных кабелей, для которых соответствующие методы расчетов не получили должного развития.

Целью настоящей работы является разработка методов, позволяющих производить конструктивные расчеты упругих элементов на основе эластомерных материалов в сочетании с определением размеров корпусных элементов электрических соединителей.

При проектировании соединителей с использованием гибких печатных кабелей (ГПК) и эла-

стомерных вкладышей могут решаться различные инженерные задачи, к тому же в разной последовательности. Однако с учетом того, что зависимости для расчета переходного контактного сопротивления для заданных контактных пар в электрических соединениях с плоскими контактами (рис. 1) уже имеются [4], расчеты конструктивных элементов целесообразно производить в такой последовательности:

- определение требуемого переходного контактного сопротивления на основании исходных данных [4];

- вычисление параметров жесткости упругих элементов (вкладышей);

- установление размеров вкладышей и корпусов соединителей, определяющих жесткость и, соответственно, давление на контакты в них.

Так как давление P на контакты создается за счет сжатия вкладыша, необходимо определить

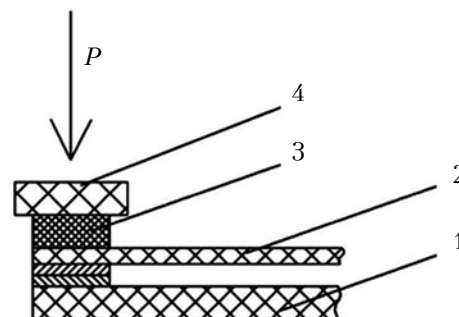


Рис. 1. Схема контактирования в электрических соединениях с плоскими контактами:

1 — жесткая печатная плата с контактной площадкой; 2 — ГПК с контактной площадкой; 3 — эластомерный вкладыш; 4 — пластина (элемент корпуса соединителя)

зависимость P от размеров вкладыша при его сжатии, когда осуществляется установка контактирующих частей.

Упругим элементом в традиционных конструкциях контактных пар электрических соединителей чаще всего являются элементы гнездовой части контактов т. е. контакты и упругие элементы одновременно. В рассматриваемых соединителях эти функции разделены — ГПК выполняет роль контактов, а роль пружины отводится эластомерному вкладышу, изготавливаемому из силиконовой резины. Очевидно, что свойства металлических упругих контактов и резиновых вкладышей существенно различаются.

Следует отметить, что одним из достоинств групповой резиновой пружины и гибкого печатного кабеля является то, что вкладыш выжимает кабель, благодаря чему увеличивается эффективная площадь контактирования.

Рассмотрим два варианта конструкции соединителей, в которых контактное давление создается посредством эластомерного вкладыша.

1. *Неразъемные или условно разъемные соединения (рис. 2).* В этих случаях усилие сочленения-расчленения не является эксплуатационным параметром соединителей, а значит не нормируется. Контактное давление создается

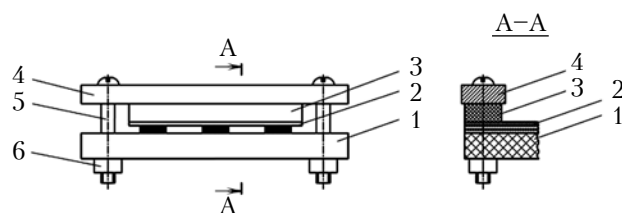


Рис. 2. Условно разъемное контактное соединение: 1 — жесткая печатная плата; 2 — ГПК; 3 — вкладыш; 4 — планка; 5 — винт; 6 — гайка

ся сжатым вкладышем, зафиксированным в заданном положении с помощью различных механических соединений (винтовых, заклепочных, защелками) в зависимости от свойств, отвечающих за ремонтопригодность, и показателей технологичности, которые необходимо получить. В данной конструкции поперечное сечение вкладыша имеет простую форму, например прямоугольную, круглую, овальную и т. п.

2. *Разъемные контактные пары (рис. 3).* В этих случаях необходимо не только обеспечить достаточное контактное давление, но и минимизировать усилие сочленения-расчленения. Для выполнения такой задачи создание контактного давления за счет только упругих сил сжатого вкладыша простой формы является неэффективным, поскольку:

— давление, создаваемое таким образом, приводит к большим усилиям сочленения-расчленения;

— накапливается значительная остаточная деформация вкладыша;

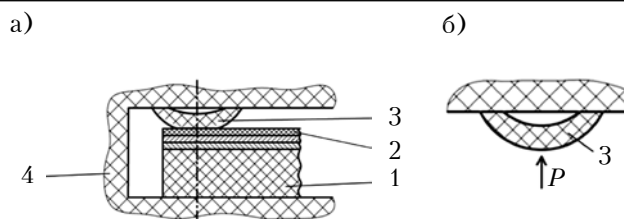


Рис. 3. Конструкция разъемного соединителя в сборе (а) и фрагмент вкладыша до сборки (б): 1 — жесткая печатная плата; 2 — ГПК; 3 — вкладыш; 4 — корпус соединителя

— определение относительно небольшого сжатия вкладыша, требуемого для создания необходимого контактного давления, может происходить с существенными погрешностями, особенно если учесть, что имеется большой разброс значений такого параметра материала вкладыша, как твердость по Шору A , и, соответственно, модуля упругости.

Этих недостатков лишена конструкция, представленная на рис. 3, которая позволяет более точно рассчитывать давление, благодаря использованию вкладыша специальной формы: при приложении усилия P он не только сжимается в объеме, но и деформируется, как пружина.

В обоих рассмотренных вариантах конструкции соединителей при сжатии и деформации вкладышей создается определенное усилие. В рамках рассматриваемой задачи проектирования соединителей оно задается, а искомой является величина деформации, которая и будет определять форму и размеры вкладышей и корпусов.

Прогиб ГПК вместе с эластомерным вкладышем в общем случае определяется как [3]

$$f = f_{\text{п}} + f_{\text{сж}} + f_{\text{изн}}, \quad (1)$$

где $f_{\text{п}}$ — прогиб оси упругого элемента;

$f_{\text{сж}}$ — величина сжатия эластомерного вкладыша в месте контактирования;

$f_{\text{изн}}$ — величина износа контактирующих поверхностей при сочленении-расчленении контактов.

Перейдем к разработке методов расчета величины сжатия эластомерных вкладышей, обеспечивающей заданное давление в контактных парах обоих рассмотренных вариантов.

Соединение, в котором давление на контакты создается только за счет сжатия вкладыша

Рассмотрим неразъемное или условно разъемное соединение, конструкция которого представлена на рис. 2. В этом случае эластомерный вкладыш, имеющий форму бруска, зажимается между двумя жесткими параллельными пластинами без смещения, поэтому прогиб его оси и износ (стирание) отсутствуют, и тогда формула (1) принимает вид

$$f = f_{\text{сж}}. \quad (2)$$

В такой конструкции сжатие выполняется равномерно (усилие распределено) по всей длине вкладыша. Таким образом, от величины сжатия зависит напряженность вкладыша и, соответственно, давление на контактные группы.

В соответствии с принятыми условиями давление задается исходя из обеспечения стабильности контакта и допустимого значения усилия сочленения-расчленения. В этом случае необходимая величина сжатия определяется в соответствии с законом Гука [5, с. 128]

$$\Delta l = \frac{Pl}{ES}, \quad (3)$$

где P — равнодействующая распределенного усилия;

l — первоначальная толщина вкладыша (размер, в соответствии с которым определяется величина сжатия, см. **рис. 4**);

E — модуль упругости первого рода материала вкладыша (модуль Юнга);

S — площадь поперечного сечения вкладыша в плоскости, перпендикулярной действию сил сжатия.

Из **рис. 4** видно, что

$$\Delta l = l - l_1,$$

где l_1 — размер вкладыша после его сжатия в результате сочленения электрического соединителя.

Отметим, что в технических условиях (**ТУ**) на силиконовые резины, как правило, приводится не модуль упругости, значение которого необходимо для расчета величины сжатия по формуле (3), а твердость в единицах Шора А. Взаимосвязь между этими величинами была определена нами следующим образом. На основании приведенной в [7] экспериментальной зависимости между значениями твердости по шкале Шора А и значениями по шкале *IRHD* (**рис. 5**) был проведен пересчет твердости из единиц Шора А в международные единицы *IRHD*. Затем с использованием приведенной в [6] зависимости твердости резины в *IRHD* от $\lg E$ были рассчитаны значения модуля упругости. Результаты расчетов сведены в **табл. 1** (часто встречающиеся значения 30 и 35 твердости по Шору А были получены экстраполяцией имеющихся на **рис. 5** данных).

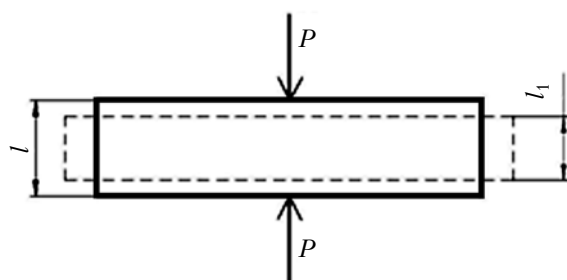


Рис. 4. Сжатие эластомерного вкладыша

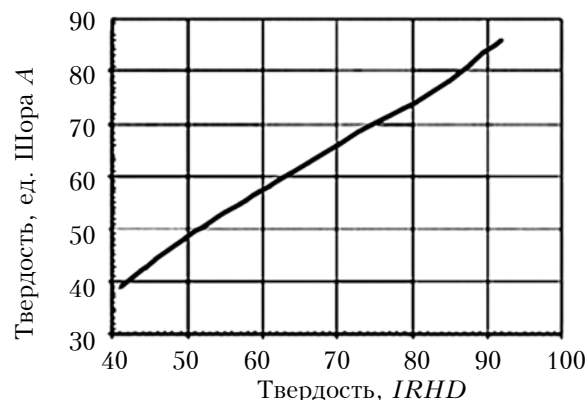


Рис. 5. Соотношение между значениями твердости силиконовых резин по шкале Шора А и по шкале *IRHD*

Таблица 1

Твердость, ед. Шора А	Твердость, <i>IRHD</i>	$\lg E$	E , МН/м ²
30	32	0,05	1,12
35	37	0,12	1,32
40	42	0,24	1,73
45	47	0,33	2,11
50	51,5	0,38	2,4
55	57,5	0,48	2,99
60	63	0,56	3,63
65	69	0,7	5,01
70	74	0,8	6,3
75	82	1,04	10,84
80	86,5	1,18	15,14
85	92	1,4	25,12

Для удобства использования полученной экспериментальной зависимости модуля упругости от твердости по Шору А было найдено аналитическое выражение, наиболее точно ее описывающее. Для этого по табличным данным был построен график зависимости E от твердости по Шору А, приведенный на **рис. 6**. При использовании программного обеспечения получен ряд

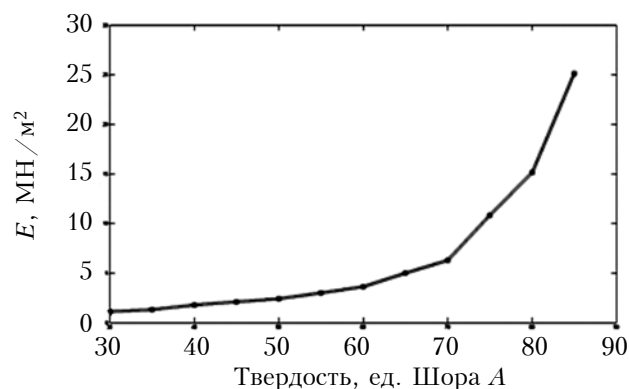


Рис. 6. Экспериментальная зависимость модуля упругости от твердости по шкале Шора А

формул различного вида, описывающих эту зависимость с той или иной степенью приближения. Далее на основании визуального анализа были отобраны те из них, графики которых наиболее приближены к графику на рис. 6. Для каждой из m отобранных формул была найдена средняя ошибка аппроксимации

$$\bar{A}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i - \hat{y}_{ki}}{y_i} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где k — номер формулы, $k=1, \dots, m$;

n — количество аппроксимируемых значений;

$y_i, \hat{y}_{ki}$ — соответственно, экспериментальное значение E , соответствующее i -му значению твердости в единицах Шора A из табл. 1, и расчетное значение модуля упругости, определенное по выбранной формуле.

Таким образом был выбран вид аналитической зависимости, для которой средняя ошибка аппроксимации была наименьшей, а именно:

$$\hat{y} = a \cdot \exp(bx) + c \cdot \exp(dx), \quad (5)$$

где x — известная твердость по Шору A .

С помощью программного обеспечения MATLAB рассчитаны коэффициенты регрессии, которые равны:

$$a = 0,5; b = 0,028; c = 6,8 \cdot 10^{-4}; d = 0,12.$$

Таким образом, искомое уравнение регрессии имеет вид

$$\hat{y} = 0,5 \cdot \exp(0,028x) + 6,8 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(0,12x). \quad (6)$$

Для оценки качества аналитической зависимости найдем индекс корреляции, который ха-

рактеризует силу связи определяемых показателей, по формуле

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{ki})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (7)$$

где $\bar{y}$ — среднее арифметическое выборки значений модуля упругости E .

Теперь можем найти индекс детерминации — коэффициент, характеризующий долю дисперсии, обусловленной регрессией:

$$D = R^2. \quad (8)$$

Оба эти коэффициента могут принимать значения от -1 до 1 . Чем ближе эти значения по модулю к 1 , тем теснее связь изучаемых параметров x и y . Величина коэффициента детерминации D служит важным критерием оценки качества моделей. Чем значительнее доля объясненной вариации, тем лучше найденная аналитическая зависимость аппроксимирует исходные данные.

Для нахождения рассмотренных показателей по формулам (4), (7), (8) составим таблицу вспомогательных величин (табл. 2) со следующими обозначениями:

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i;$$

$$A_i = \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|;$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{77,76}{12} = 6,48.$$

Значения рассматриваемых индексов составили $R = 0,999$ и $D = 0,998$, что удовлетворяет

Таблица 2

i	x_i	y_i	$\hat{y}_i$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	ε_i	ε_i^2	A_i
1	30	1,12	1,18	-5,36	28,73	-0,06	0,004	0,06
2	35	1,32	1,42	-5,16	26,63	-0,09	0,009	0,07
3	40	1,78	1,66	-4,7	22,09	0,12	0,013	0,06
4	45	2,11	1,98	-4,37	19,1	0,13	0,018	0,06
5	50	2,4	2,38	-4,08	16,65	0,02	0,0004	0,008
6	55	2,99	2,93	-3,49	12,18	0,06	0,003	0,019
7	60	3,63	3,73	-2,8/5	8,12	-0,1	0,01	0,03
8	65	5,01	4,94	-1,47	2,16	0,07	0,005	0,014
9	70	6,3	6,86	-0,18	0,03	-0,56	0,32	0,09
10	75	10,84	10,05	4,36	19,01	0,79	0,63	0,07
11	80	15,14	15,49	8,66	74,99	-0,35	0,12	0,02
12	85	25,12	25,006	18,64	347,45	0,11	0,01	0,005
Σ	—	—	—	—	577,139	0,14	1,14	0,52

заданным условиям использования выбранного уравнения регрессии (6). В данном случае индекс детерминации равен 99,8%, т. е. уравнение регрессии объясняет 99,8% дисперсии результативного признака, тогда как остаточная дисперсия составляет всего 0,2%. Согласно уравнению (4), средняя ошибка аппроксимации $\bar{A}$ при использовании уравнения регрессии (6) составляет 4,31%, что также является приемлемым.

Уравнение регрессии (6) в графическом виде приведено на рис. 7, что также можно использовать для нахождения значений модуля упругости по известным значениям твердости по шкале Шора А.

Таким образом, получена аналитическая зависимость, позволяющая с определенной точностью установить связь между приводимыми в технических условиях и справочных данных значениями твердости в единицах Шора А и модулем упругости E , который входит в формулу для определения величины сжатия эластомерных вкладышей.

Пример расчета. Рассчитаем величину сжатия вкладыша, необходимую для обеспечения надежного электрического контакта ГПК и жесткой печатной платы (ЖПП) в конструкции соединителя, приведенной на рис. 2.

Пусть в качестве вкладыша используется брусок размерами 30×5×5 мм из силиконовой резины, твердость которой по шкале Шора А составляет 75 единиц; покрытие контактных элементов на ГПК и ЖПП — серебро.

Предварительный анализ устройства, в котором будет использоваться соединитель, показал, что для его стабильной работы достаточно обеспечить переходное сопротивление 0,5 мОм. С помощью полученных в [4] зависимостей (см. рис. 4 или формулу (2) в [4]) было определено, что такое сопротивление достигается при величине удельного давления 0,12 кг/мм²

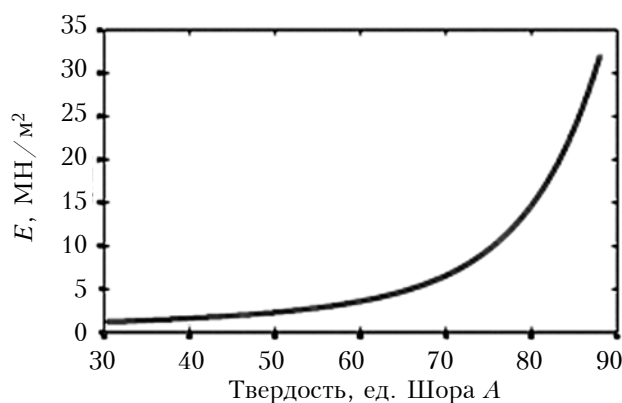


Рис. 7. Аналитическая зависимость модуля упругости от твердости по шкале Шора А

или 1,18 Н/мм² (размеры в мм используем для удобства).

Для расчета необходимой величины сжатия вкладыша Δl воспользуемся формулой (3), определив сначала входящие в нее величины:

$S=150 \text{ мм}^2$; $l=5 \text{ мм}$; $P=177 \text{ Н}$; $E=10,84 \text{ МН/мм}^2$ (или 10,84 Н/мм²).

Тогда получим

$$\Delta l = \frac{177 \text{ Н} \cdot 5 \text{ мм}}{10,84 \text{ Н/мм}^2 \cdot 150 \text{ мм}^2} = 0,54 \text{ мм}.$$

Соединение, в котором давление на контакты создается за счет сжатия и упругой деформации пружины (вкладыша)

Рассмотрим разъемное соединение, конструкция которого представлена на рис. 3. В этом случае величиной износа контактирующих поверхностей можно пренебречь, поскольку ее значение значительно меньше других возникающих составляющих прогиба. Например, если величина прогиба со сжатием будет равна 1 мм, то даже при полном износе покрытий на обеих контактирующих поверхностях величина износа составит примерно 10 мкм, т. е. не более 1%.

Таким образом, в соответствии с формулой (1), для рассматриваемого типа контактирования прогиб ГПК с вкладышем будет определяться, как

$$f = f_{\text{п}} + f_{\text{сж}}. \quad (9)$$

Это значит, что усилие P в контактной паре определяется жесткостью c вкладыша и величиной его перемещения $f_{\text{п}}$ в местах приложения усилий [3]:

$$P = c f_{\text{п}}, \quad (10)$$

$$c = n E J_x / l^3, \quad (11)$$

где n — коэффициент, зависящий от вида балки и расположения точки приложения контактного усилия (для рассматриваемого случая, когда балка расположена на двух опорах с приложенной силой в центре вкладыша, $n = 48$);

J_x — момент инерции поперечного сечения вкладыша, мм⁴;

l — активная длина вкладыша (по поперечному сечению), мм.

Для принятой формы поперечного сечения вкладыша — сектора толстостенного кольца (рис. 8) — момент инерции рассчитывается по формуле [3, табл. 6.2]

$$J_x = J_{x1} - F y_c^2, \quad (12)$$

где

$$J_{x1} = \frac{R^4 - r^4}{8} \left(\pi \frac{\alpha}{180^\circ} + \sin \alpha \right); \quad (13)$$

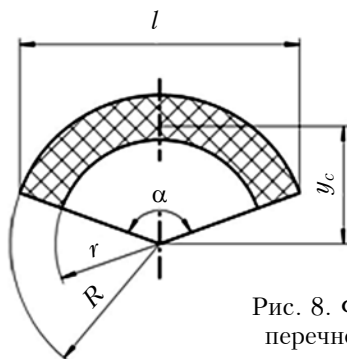


Рис. 8. Форма и параметры поперечного сечения вкладыша

$$F = \pi(R^2 - r^2) \frac{\alpha}{360^\circ}, \quad (14)$$

$$y_c = \frac{4}{3} \cdot \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{180^\circ}{\pi \alpha}, \quad (15)$$

где α приводится в градусах.

Как говорилось выше, величина усилия P задается на основании результатов исследований [4], и после определения жесткости можно определить величину прогиба вкладыша $f_{\text{п}}$ в соответствии с выражением (10):

$$f_{\text{п}} = P/c. \quad (16)$$

Одновременно с прогибом вкладыша происходит его сжатие, величина которого $f_{\text{сж}}$, как и в предыдущей конструкции соединителя, определяется по формуле (3). При этом величину поперечного сечения вкладыша (рис. 8) можно определить по формуле

$$S = \pi D_{\text{ср}} d \frac{\alpha}{360^\circ}, \quad (17)$$

где $D_{\text{ср}}$ — средний диаметр сектора толстостенного кольца;

d — длина вкладыша.

Если использовать принятые на рис. 8 обозначения, то формулу (17) можно записать следующим образом:

$$S = \pi(R + r) \cdot \frac{\alpha}{360^\circ} \cdot d. \quad (18)$$

Таким образом, в соответствии с формулой (3) получим

$$f_{\text{сж}} = \Delta l = \frac{Pl \cdot 360^\circ}{E\pi(R + r)\alpha d}. \quad (19)$$

Пример расчета. Произведем расчет необходимой величины прогиба вкладыша, поперечное сечение которого показано на рис. 8.

В качестве исходных данных примем следующие:

$R = 10$ мм; $r = 5$ мм; $\alpha = 120^\circ$; $d = 30$ мм; $l = 14$ мм; $P = 20$ Н; $E = 2,4$ Н/мм² (что соответствует твердости, равной 50 единиц по Шору А).

Найдем величину прогиба вкладыша $f_{\text{п}}$ по формуле (16), предварительно определив его жесткость с помощью формул (11) — (15):

$$J_{x1} = \frac{10000 - 625}{8} (3,14 \frac{120}{180} + \sin 120^\circ) = 3476;$$

$$F = 3,14 \cdot (100 - 25) \frac{120}{360} = 78,9;$$

$$y_c = \frac{4}{3} \cdot \frac{1000 - 125}{100 - 25} \sin \frac{120}{2} \cdot \frac{180}{3,14 \times 120} = 6,48;$$

$$J_x = 3476 - 78,9 \cdot 6,48^3 = 163;$$

$$c = \frac{48 \cdot 2,4 \cdot 163}{2744} = 6,84 \text{ Н/мм};$$

$$f_{\text{п}} = \frac{20}{6,84} = 2,92 \text{ мм}.$$

Выполняем расчет величины сжатия вкладыша по формуле (19):

$$f_{\text{сж}} = \frac{20 \cdot 5 \cdot 360}{2,4 \cdot 3,14 \cdot (10 + 5) \cdot 120 \cdot 30} = 0,09 \text{ мм}.$$

Полная деформация вкладыша равна:

$$f = f_{\text{п}} + f_{\text{сж}} = 2,92 + 0,09 = 3,01 \text{ мм}.$$

Заключение

Таким образом, разработаны методы, которые позволяют проводить конструктивные расчеты упругих элементов (вкладышей) на основе эластомерных материалов, выполняющих роль групповой пружины в разъёмных и неразъёмных электрических соединителях на основе гибких печатных кабелей. Они могут быть использованы для нахождения величины усилия, необходимого для обеспечения заданного значения переходного сопротивления контакта.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Yefimenko A. A. Electrical connectors for surface solderless mounting // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 4. — С. 9 — 15.
2. Белоусов А.К., Савченко В.С. Электрические разъёмные контакты в радиоэлектронной аппаратуре. — Москва: Энергия, 1975. — 320 с.
3. Левин А.П. Контакты электрических соединителей радиоэлектронной аппаратуры (расчет и конструирование). — Москва: Сов.радио, 1972. — 216 с.
4. Ефименко А.А., Мерлян С.В. Переходное контактное сопротивление в электрических соединениях с плоскими контактами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2013. — № 4. — С. 3 — 7.
5. Заблонский К.И., Беляев М.С., Телис И.Я. и др. Проектирование механизмов и приборов. — Киев: Вища школа, 1971. — 520с.
6. ГОСТ 20403-75. Резина. Метод определения твердости в международных единицах (от 30 до 100 IRHD).
7. http://ctborracha.com/?page_id=1590

Дата поступления рукописи
в редакцию 15.03 2016 г.

РОЗРАХУНОК ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У КОНСТРУКЦІЯХ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНУВАЧІВ НА ОСНОВІ ГНУЧКИХ ДРУКОВАНИХ КАБЕЛІВ

Наведено методику визначення конструктивних параметрів елементів роз'ємних та нероз'ємних з'єднувачів на основі гнучкого друкованого кабелю. Вирішено проблему переходу від одиниць виміру твердості, зазначених в технічних умовах на гуми, до величини модуля пружності, що використовується при розрахунках конструктивних параметрів з'єднувачів. Наведено приклади розрахунку необхідної для забезпечення надійного контакту величини стиснення еластомірного вкладиша при заданій величині перехідного опору з'єднувача.

Ключові слова: електричний з'єднувач, еластомірний вкладиш, перехідний опір, твердість, пружність, гнучкий друкований кабель, зусилля зчленування-розчленування.

DOI: 10.15222/ТКЕА2016.2-3.08
UDC 621.37:621.311

А. А. YEFIMENKO, S. V. MERLYAN

Ukraine, Odessa National Polytechnic University
E-mail: aiefimen@gmail.com, stasmerlyan@gmail.com

AN ELASTIC ELEMENTS CALCULATION IN THE CONSTRUCTION OF ELECTRICAL CONNECTORS BASED ON FLEXIBLE PRINTED CABLES

In this article we consider the method of constructive parameters calculation of the elastic elements, which are used in electrical connectors of flexible printed cables. Electrical connectors characterized by the fact that the contact pair is needed to provide pressure. It is also important to know the optimum ratio between stability of the contact connection and the necessary value of the transition resistance. These ratios are studied sufficiently for discrete electrical connectors, however for connectors of flexible printed cables this theme is not explored enough. The purpose of this work is to develop methods that will allow to carry out calculations for elastic elements, which provide communication, and to determine the size of case elements for electrical connectors. We consider two types of connectors. First are removable electrical connections where it is necessary to find a compromise between the resistance value and the separating (engaging) force. Second are permanent connections, where counts only the value of the transition resistance.

For the first type of connectors were considered a simple form of the liner, in the shape of a rubber block, as in this case, the pressure should be created only by the compression of the liner and fixing it. It is important to get accurate results of the pressure calculation for removable electrical connections, because in this case we consider especial shape of elastomeric liner, which allows to create the pressure not only by compression of the liner, but by deformation it as a spring.

For this task, the engaging force was specified on the basis of already known facts. It was important to set the amount of deformation that defines the shape and size of the liner and the case. We solved the problem of transition from the units of measuring hardness, specified in the technical specifications of rubber, to the value of the Young's modulus used in the calculations of constructive parameters of connectors. We got an analytic dependence that can be used to find the Young's modulus for a known value of hardness on a scale Shore A. We gave examples of the amount of compression calculation in the elastomeric liner to provide a reliable contact for specified values of the transition resistance for the removable and permanent connectors based on flexible printed cable.

Keywords: electrical connector, elastomeric liner, transient voltages, hardness, elasticity, flexible printed cable, connector mated set separating (engaging) force.

REFERENCES

1. Yefimenko A. A. Electrical connectors for surface solderless mounting. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2012, no 4, pp. 9-15.
2. Belousov A.K., Savchenko V.S. *Elektricheskie raz'emnye kontakty v radioelektronnoy apparature* [Electrical plug contacts in electronic equipment]. Moscow, Energiya, 1975, 320 p. (Rus)
3. Levin A.P. *Kontakty elektricheskikh soedinitelei radioelektronnoy apparatury (raschet i konstruirovaniye)* [Contacts electrical connectors electronics (calculation and design)]. Moscow, Sov. radio, 1972, 216 p.
4. Efimenko A. A., Merlyan S. V. [Transient contact resistance in electrical connections with flat pins]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2013, no 4, pp. 3-7. (Rus)
5. Zablonkiy K.I., Belyaev M.S., Telis I.Ya. et al. *Proektirovaniye mekhanizmov i priborov* [Design of mechanisms and instruments]. Kiev, Visch'a shkola, 1971, 520 p.
6. State Standard 20403-75. [Rubber. Method for determining the hardness in international units (30 to 100 IRHD)] (Rus).
7. http://ctborracha.com/?page_id=1590

Д. т. н. И. Ш. НЕВЛЮДОВ, к. т. н. В. А. ПАЛАГИН,
к. т. н. Е. А. РАЗУМОВ-ФРИЗЮК, к. т. н. И. В. ЖАРИКОВА

Украина, Харьковский национальный университет радиоэлектроники
E-mail: iryna.zharikova@nure.ua

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОЗОНДОВЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ С ШАРИКОВЫМИ ВЫВОДАМИ

В продолжение работ авторов по проектированию многозондового подключающего устройства для контроля изделий с матричными шариковыми выводами, представлены новые результаты исследований опытного образца устройства. Предложено изменить форму зонда для снижения трудоемкости проектирования МПУ. Разработана коммутационная плата с ZIP-разъемами для подключения МПУ к автоматизированному измерительному устройству.

Ключевые слова: электронные компоненты, BGA, многозондовое подключающее устройство, тестирование, контактирование, гибкий шлейф, полиимид фольгированный.

Актуальным направлением совершенствования методов электрического контроля электронных компонентов является разработка многозондовых подключающих устройств (МПУ) [1, 2]. Такие устройства призваны решить проблему миниатюризации измерительного оборудования на приборостроительных предприятиях за счет новаторских конструктивно-технологических решений [3–5]. В частности, МПУ могут быть использованы для тестирования поверхностно-монтажных микросхем в корпусах BGA — микросхем с шариковыми выводами. Количество выводов таких компонентов постоянно увеличивается, что усложняет процесс их электрического контроля, повышая при этом стоимость устройств контроля [6].

Авторами разработаны МПУ, предназначенные для входного и функционального контроля электронных компонентов. Отличительной особенностью данных устройств является их исполнение в виде гибких многослойных шлейфов, изготовленных на основе фольгированного полиимиды. Предложенные конструктивно-технологические решения детально описаны в нескольких работах [7–11]. В данной статье представлены новые результаты, полученные при проектировании и изготовлении опытных образцов МПУ.

Конструктивно-технологические особенности МПУ

Одним из преимуществ МПУ является специальная форма контактного зонда. В предыдущих наших работах описывались МПУ с зондами, расщепленными на четыре части [7–9, 11]. Они были запатентованы и предназначались для обеспечения возможности самомониторинга тестирующего устройства, а также для надежного

контактирования с шариковым выводом за счет достаточной площади контакта. Однако трудоемкость проектирования МПУ с такими зондами была большой за счет высокой сложности трассировки многослойного подключающего полиимидного шлейфа. Поэтому при разработке очередной топологии было принято решение перейти на новую форму зонда, состоящего из двух частей (рис. 1). Подобное расщепление зонда позволяет осуществить самотестирование системы контроля, поскольку сигнал на автоматизированном измерительном комплексе (АИК), куда подключается МПУ, будет регистрироваться только в том случае, если части зонда будут между собой соединены электрически — в момент контактирования с шариковым выводом микросхемы в корпусе BGA.

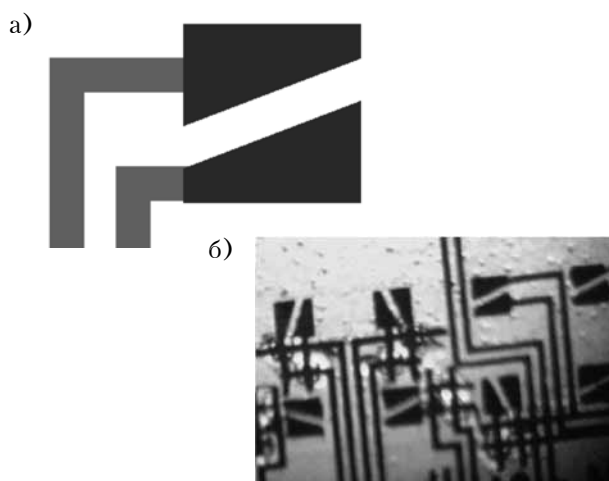


Рис. 1. Форма зонда (а) и фотография контактного поля (б) МПУ

Прижатие контактного поля с описанными зондами к объекту контроля осуществляется сжатым воздухом в специально спроектированном корпусе МПУ, что позволяет обеспечивать одинаковую силу прижатия всех зондов ($0,03—0,3$ Н на каждый контакт «зонд — шариковый вывод микросхемы») [7, 12]. Благодаря одинаковому контактному давлению в контактных парах количество ошибок во время контроля значительно снижается по сравнению с другими устройствами контроля с перемещаемыми контактами. Помимо этого, МПУ также обеспечивает отсутствие деформации шариковых выводов во время контактирования за счет использования плоской формы зондов вместо подпружиненных иголок, применяемых в конструкциях аналогичного назначения [6].

Прижимающая пластина МПУ

Для реализации преимуществ МПУ немаловажную роль играет топология прижимающей пластины, представляющей собой многослойный гибкий шлейф на основе фольгированного полиимида.

Варианты топологии опытного образца прижимающей пластины разрабатывались под тестирование микросхем в корпусах FG-320 с количеством выводов, равным 320, и шагом их размещения 1 мм. Диаметр шарикового вывода — 600 мкм [13].

В качестве материала прижимающей пластины для нового опытного образца выбран фольгированный полиимид ФДИ-А-35 (толщина слоя полиимида 15 мкм и алюминия 20 мкм) [14], который характеризуется достаточной гибкостью и при этом стабильностью электрических характеристик. Трассировка выполнена проводниками шириной 70 мкм, минимальное расстояние между которыми также составляет 70 мкм (рис. 2).

Методы создания многослойных фольгированных шлейфов из полиимида широко применяются в микроэлектронике, в частности, технология создания многослойных коммутационных плат на основе односторонней лакофольгированной полиимидной пленки разработана в харьковском НИТИ Приборостроения. Изготовление гибких носителей производится с помощью метода двусторонней фотолитографии.

Для разработки прижимающей пластины с указанными параметрами достаточно двухслойной трассировки. В первом (верхнем) слое находятся зонды и часть проводников. Поскольку алюминий быстро окисляется, для предотвращения окисления и обеспечения надежного соединения при контактировании с шариковыми выводами объекта контроля зонды МПУ гальваническим способом покрываются никелем тол-

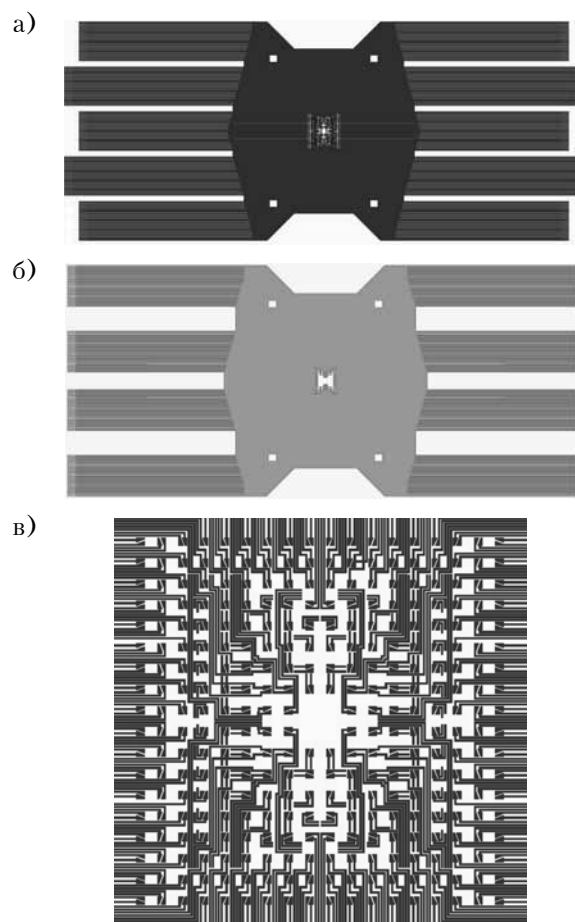


Рис. 2. Топология прижимающей пластины МПУ: а — первый слой; б — второй слой; в — контактные элементы

щиной 5—10 мкм. Второй слой используется для трассировки оставшейся части проводников. Межслойные соединения проводников осуществляются ультразвуковой сваркой через окна в изоляции размерами 200×200 мкм. Слои склеиваются полиимидным клеем.

Внешние концы прижимающей пластины МПУ армируются восемнадцатью 40-выводными ZIF-разъемами (шаг контактируемых проводников 500 мкм), необходимыми для подключения полиимидного шлейфа к АИК (рис. 3). Такое количество разъемов связано с тем, что от контактного поля МПУ к АИК идут 640 проводников (согласно конструкции зонда — по два от каждого из 320 контролируемых выводов микросхемы в корпусе FG-320). Эти проводники разведены на обе стороны подключающей пластины МПУ в двух слоях. Стоит отметить, что при разработке способа подключения МПУ к автоматизированному измерительному комплексу была разработана специальная коммутационная плата на жестком основании с установленными на ней 40-выводными ZIF-разъемами, предполагающая потенциальную возможность подключения

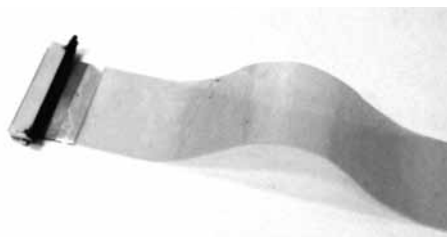


Рис. 3. Подключение шлейфа опытного образца к ZIF-разъему



Рис. 4. Коммутационный модуль

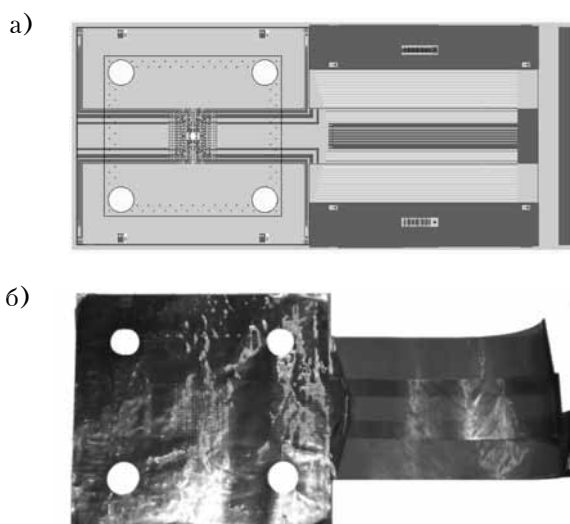


Рис. 5. Топология (а) и общий вид (б) опытного образца прижимающей пластины МПУ

МПУ к большому количеству выводов при контроле других электронных компонентов (рис. 4). Таким образом, общее количество проводников подключающей пластины МПУ равно 720, часть которых не несут информации, а служат для надежного механического соединения с имеющейся типовой оснасткой.

Разработанный шлейф имеет две оси симметрии, таким образом, проводниковая система и контактные элементы в каждой из четырех частей шлейфа повторяют друг друга. При этом наиболее дорогостоящей операцией при изготовлении подобных шлейфов является межслойная сварка. Поэтому при изготовлении опытного образца прижимающей пластины МПУ (рис. 5) с целью снижения его

себестоимости было принято решение отказаться от изготовления части шлейфов подключения к ZIF-разъемам и подключать к измерительному комплексу только четвертую часть проводников, чего вполне достаточно для проверки качества контактирования шариковых выводов контролируемой микросхемы с зондами МПУ.

Анализ качества контактирования зондов МПУ с шариковыми выводами

Важным требованием к МПУ является обеспечение необходимых электрических параметров: сопротивления проводников, паразитной емкости, временных и частотных характеристик.

Одной из основных проблем, возникающих во время контроля компонентов BGA, является получение стабильного переходного сопротивления в зоне контакта. Поэтому при оценивании эксплуатационной надежности подключающего устройства немаловажную роль играет исследование распределения сопротивления контактов [11, 15].

Нами было исследовано влияние давления в корпусе МПУ на величину переходного сопротивления в зоне контакта «шариковый вывод — полиимидный шлейф» [11].

Для измерения переходного сопротивления использовались макеты BGA-компонентов («dummies»), была вскрыта их крышка, что обеспечило доступ к контактам с двух сторон. Измерения проводились для разного числа подключаемых к МПУ выводов. К контактам постоянно были припаяны проводники.

Для проведения измерений был использован четырехзондовый метод, который позволяет исключить влияние сопротивления соединительных проводов вольтметра ввиду его большого входного сопротивления, а сопротивления соединительных проводов источника тока — путем подстройки нужной величины тока, обеспечивая устранение погрешностей измерений.

Суть эксперимента заключается в анализе изменения сопротивления в зависимости от изменения давления в контактной группе «шариковый вывод — полиимидная пленка». Для обеспечения необходимого давления использовались разновесы от 1 до 150 г.

На рис. 6, а представлены кривые, построенные по результатам шести измерений, для группы контролируемых выводов из двадцати контактов в целом, а на рис. 6, б — усредненные результаты полученных значений, исходя из расчета давления на каждый контактный элемент в отдельности.

Из полученных зависимостей следует, что при силе прижатия каждого контакта от 0,01 до 0,03 Н сопротивление в области контакта резко падает,

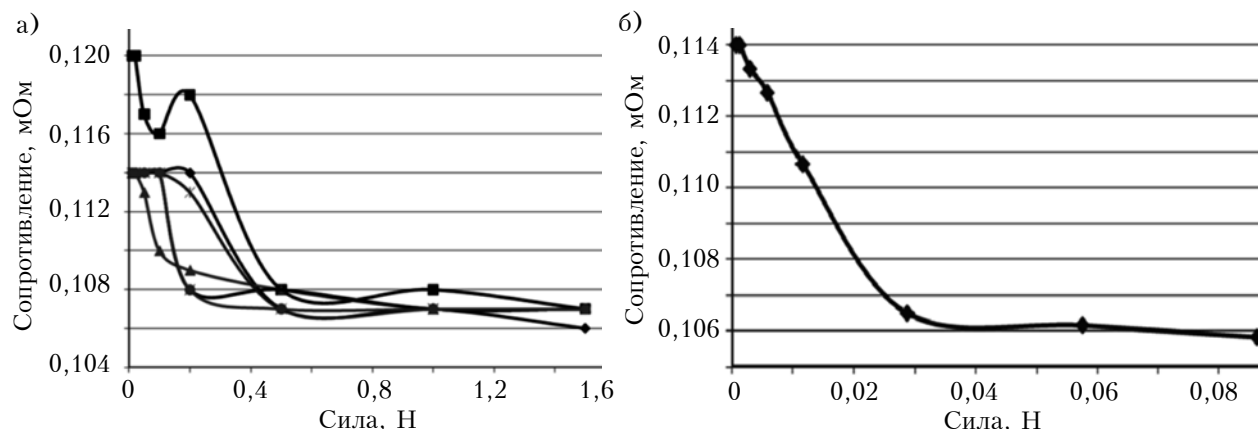


Рис. 6. Изменение величины переходного сопротивления в зависимости от давления в корпусе МПУ, построенные по результатам шести измерений (а), и усредненные результаты (б)

а в интервале от 0,03 до 0,09 Н — также продолжает падать, но уже достаточно медленно.

Проанализировав полученные результаты, а также требования стандарта [12] к величине контактного усилия при контроле электронных компонентов с использованием многозондовых подключающих устройств, можно сделать вывод, что в корпусе разработанного МПУ при прижатии подключающего шлейфа к BGA-компоненту сжатым воздухом значение силы, действующей на один шариковый вывод, должно составлять не менее 0,03 Н. При этом для контроля микросхемы в корпусе FG-320, площадь контактной зоны которой составляет около 400 мм², минимальное давление в корпусе МПУ должно быть равным 0,024 МПа.

Важным параметром с точки зрения надежности контактирования зонда МПУ с контролируемым шариковым выводом является точность их совмещения. Исследование данного параметра проводилось авторами для зондов, разделен-

ных на четыре части [11]. Очевидно, что при переходе от такой контактной площадки к зонду, состоящему из двух частей, существенных изменений в работе МПУ наблюдаться не будет, поскольку в обоих случаях контакты изготовлены из одинаковых материалов, а размеры контактов отличаются незначительно.

Геометрическая модель смещения шарикового вывода относительно зонда МПУ показана на рис. 7.

Рассчитав значение приращения переходного сопротивления ΔR в контактной группе относительно начальной величины сопротивления (при нулевом смещении), можно определить максимально возможные значения горизонтального смещения шарикового вывода относительно зонда МПУ вдоль оси X и углового смещения α шарикового вывода относительно зонда МПУ вдоль оси Y, при которых будет сохраняться стабильный электрический контакт. Таким образом, максимально допустимое значение приращения переходного сопротивления $\Delta R_{гр}$ в области контакта будет составлять около 0,001 Ом [11]. Как уже отмечалось, данные, полученные для зонда, расщепленного на четыре части, отображают также реальный диапазон величин переходного сопротивления при контактировании с контролируемым выводом микросхемы с использованием предложенного МПУ с новой формой зонда.

Закключение

Таким образом, благодаря предложенной новой форме зонда МПУ для контроля микросхем с шариковыми выводами удалось упростить топологию прижимающей пластины.

Разработанная коммутационная плата с ZIF-разъемами позволяет реализовать подключение МПУ к автоматизированному измерительному

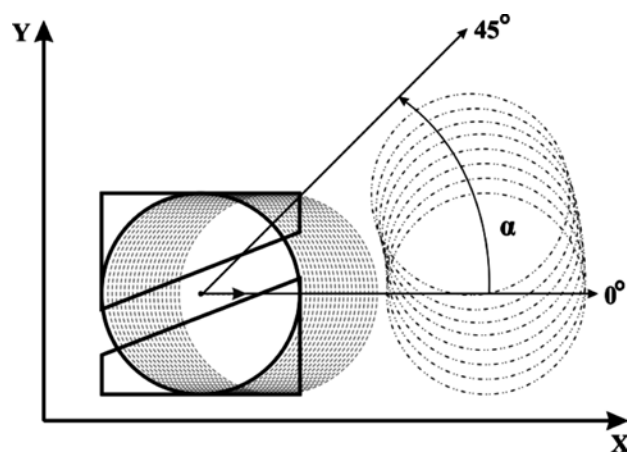


Рис. 7. Смещение вывода микросхемы относительно зонда МПУ

комплексу, забезпечиваючи також можливість застосування МПУ в майбутньому для тестування інших електронних компонентів з великою кількістю виводів.

Отримані в ході експериментальних досліджень і моделювання результати обґрунтовують основні вимоги до МПУ, які необхідно виконувати при його підключенні до об'єкта контролю.

ВІКОРИСТАНІ ІСТОЧНИКИ

1. Семенец В. В., Кратц Дж., Невлюдов І. Ш., Палагін В. А. Технологія між'єднань електронної апаратури: Учеб. для вузів. — Харків: СМІТ, 2005.
2. Невлюдов І. Ш., Андрусеви́ч А. А., Палагін В. А. Мікроелектромеханічні системи і нанотехнології. — Харків: Колле́гіум, 2007.
3. Пат. 95190 України. Мікроелектромеханічний багатозондовий підмикальний пристрій / В. Н. Борщов та ін. — 2011. — Бюл. № 13.
4. Пат. 97538 України. Мікроелектромеханічний багатозондовий контактний пристрій / В. Н. Борщов та ін. — 2012. — Бюл. № 18.
5. Пат. 98539 України. МЕМС-інтерфейс багатоточкових автоматичних контролюючих комплексів / І. В. Жарікова та ін. — 2012. — Бюл. № 10.
6. Чин-Май Ко, Минг-Кун Чень, Ю-Цзунг Хуанг, Шень-Ли Фу. Надійність тестування BGA-компонентів // Технології в електронній промисловості. — 2009. — № 4. — С. 38–42.
7. Невлюдов І. Ш., Палагін В. А., Разумов-Фризюк Е. А. і др. Підключаюче МЭМС-устройство для контролю BGA-компонентів // Технологія і конструювання в електронній апаратурі. — 2012. — № 1. — С. 54–56.

8. Nevliudov I. Sh., Palagin V. A., Razumov-Frizjuk E. A., Zharikova I. V. MEMS intellect multiprobes contacting devices for electrical checking-up of multilayers commutative boards and BGA/CSP electronic components // Proc. of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2012). — Ukraine, Kharkov. — 2013. — P. 483–485.

9. Невлюдов І. Ш., Палагін В. А., Разумов-Фризюк Е. А. і др. Топологія гнучкого шлейфа для підключення до автоматизованих вимірних комплексів мікросхем корпусу FG-320 // Технологія приборостроєння. — 2012. — № 1. — С. 21–25.

10. Жарікова І. В., Курапов С. В., Невлюдов І. Ш. і др. Трасировка підключаючої пластини багатозондового пристрою контролю BGA-компонентів // Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки. — 2013. — № 2. — С. 28–36.

11. Жарікова І. В. Багатозондові підмикальні пристрої для електричного контролю виробів електронної техніки / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Харк. нац. ун-т радіоелектроніки. — 2013.

12. ОСТ 1114.1011-99. Мікросхеми інтегральні. Система і методи статистичного контролю і регулювання технологічного процесу. — Москва: ЦНІИ 22, 1999.

13. Fine Pitch BGA (FG320/ FG320) Package // Xilinx, Inc. — PK071 (v1.2.1). — 2005.

14. ТУ 11-83 БУО.037.108 ТУ «ФДІ-А».

15. Lumbantobing A., Kogut L., Komvopoulos K. Electrical Contact Resistance as a Diagnostic Tool for MEMS Contact Interfaces // Journal of Microelectromechanical Systems. — 2004. — Vol. 13, iss. 6. — P. 977–987. — <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2004.838388>

Дата отримання рукопису
в редакцію 09.02 2016 г.

І. Ш. НЕВЛЮДОВ, В. А. ПАЛАГІН, Є. А. РАЗУМОВ-ФРИЗЮК, І. В. ЖАРІКОВА

Україна, Харківський національний університет радіоелектроніки
E-mail: iryna.zharikova@nure.ua

ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОЗОНДОВИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ З КУЛЬКОВИМИ ВИВОДАМИ

В продовження робіт авторів з проектування багатозондового підмикального пристрою (БПП) для контролю виробів з матричними кульковими виводами, представлено нові результати досліджень експериментального зразка пристрою. Запропоновано змінити форму зонда для зниження трудомісткості проектування БПП. Розроблено комутаційну плату з ZIP-роз'ємами для підключення БПП до автоматизованого вимірювального пристрою.

Ключові слова: електронні компоненти, BGA, багатозондовий підмикальний пристрій, тестування, конструювання, гнучкий шлейф, полімід.

DOI: 10.15222/TKEA2016.2-3.15
UDC 621.317

I. Sh. NEVLYUDOV, V. A. PALAGIN,
E. A. RAZUMOV-FRIZYUK, I. V. ZHARIKOVA

Ukraine, Kharkiv National University of Radio Electronics
E-mail: iryna.zharikova@nure.ua

DESIGN OF MULTIPROBE DEVICES FOR ELECTRONIC COMPONENTS WITH BALL LEADS TESTING

In the article design and technological features of multiprobe connecting device for testing the electronic components with matrix ball leads are described and substantiated. Such test fixture has probes made as two separated flatcontact lands that can be used for testing BGA/CSP components or microelectromechanical devices. Only in case, when two parts of probe contact lands are pressed to according lead of electronic component, electrical circuit between them closes. This fact confirms presence of contact between testing fixture probe and tested lead of BGA device and can be considered as way of testing reliability increasing. Due to the proposed new form of contact probe for electronic component testing it became possible to simplify the topology of connecting circuit board.

Developed commutative board with ZIF connectors allows realizing multiprobe device connection to automated measuring systems, providing also the possibility of its future application to test other electronic components with more leads. Also the results of experimental and modeling research of developed device prototype are presented and explained. Obtained results substantiate the basic requirements for the multiprobe connecting device that should be observed during its contacting to the unit under test.

Designed test fixture is more simple and cheap in comparison with its analogues. Also developed method of testing effectively provides the necessary contact pressure between test fixture and unit under test without hazard of its deformation which can appear in similar devices.

Keywords: electronic components, BGA, multiprobe connecting device, testing, contacting, flexible PCB, polyimide.

REFERENCES

1. Semenets V. V., Kratts Dzh., Nevlyudov I. Sh., Palagin V. A. *Tekhnologiya mezhsoedinenii elektronnoi apparatury. Ucheb. dlya vuzov* [Interconnection technology of electronic devices]. Kharkov, SMIT, 2005, 432 p. (Rus)
2. Nevlyudov I. Sh., Andrushevich A. A., Palagin V. A. *Mikroelektromekhanicheskie sistemy i nanotekhnologii* [Microelectromechanical systems and nanotechnologies]. Kharkov, Collegium, 2007, 268 p. (Rus)
3. Borshchov V. N. et al. [Microelectromechanical multiprobes connecting device]. Patent UA no. 95190, 2011. (Ukr)
4. Borshchov V. N. et al. [Microelectromechanical multiprobes contact device]. Patent UA no. 97538, 2011. (Ukr)
5. Zharikova I. V. et al. [MEMS-interface of multipoint automatic testing equipment]. Patent UA no. 98539, 2012.
6. Ching-Mai Ko, Ming-Kun Chen, Yu-Jung Huang, Shen-Li Fu. [BGA-components testing reliability]. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti*, 2009, no. 4, pp. 38-42. (Rus)
7. Nevlyudov I. Sh., Martynyak R. M., Palagin V. A., Slobodyan B. S., Razumov-Frizyuk E. A., Zharikova I. V., Dmytriv M. I., Belyaev A. S. [Connecting MEMS device for BGA components functional testing]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2012, no. 1, pp. 54-56. (Rus)
8. Nevlyudov I. Sh., Palagin V. A., Razumov-Frizyuk E. A., Zharikova I. V. MEMS intellect multiprobes contacting devices for electrical checking-up of multilayers commutative boards and BGA/CSP electronic components. *Proc. of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2012)*. Ukraine, Kharkov, 2013, pp. 483-485.
9. Nevlyudov I. Sh., Palagin V. A., Razumov-Frizyuk E. A., Zharikova I. V., Borshchov V. N. [Flexible PCB topology for chip package FG-320 connection to automated measuring complexes]. *Tekhnologia Priborostroenia*, 2012, no. 1, pp. 21-25. (Rus)
10. Zharikova I. V., Kurapov S. V., Nevlyudov I. S., Palagin V. A., Razumov-Frizyuk E. A., Chechenia V. S. [Tracing of connecting plate of multiprobe device of control of BGA-components]. *Visnyk of Zaporizhzhya National University. Physical and mathematical Sciences*, 2013, no. 2, pp. 28-36. (Rus)
11. Zharikova I. V. *Bagatozondovi pidmikal'ni pristroyi dlya elektrichnogo kontrolyu virobiv elektronnoyi tekhniki. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk.* [The multiprobes connecting devices for electrical testing of electronic devices. PhD diss.]. Kharkiv, 2013, 22 p. (Ukr)
12. Standard 1114.1011-99 [Microcircuits integrated. The system and methods of statistical control and process control]. Moscow, TzNII 22, 1999, 78 p.
13. Fine Pitch BGA (FG320/ FGG320) Package. Xilinx, Inc., PK071 (v1.2.1), 2005.
14. Tekhnicheskie usloviya 11-83 BYO.037.108 TY «ФДИ-А».
15. Lumbantobing A., Kogut L., Komvopoulos K. Electrical contact resistance as a diagnostic tool for MEMS contact interfaces. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2004, vol. 13, iss. 6, pp. 977-987. <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2004.838388>

К. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО, А. М. ПИЛИПЕНКО, Э. В. СЛОНИН,
к. т. н. И. К. СУНДУЧКОВ, В. В. ЧМИЛЬ

Украина, г. Киев, НПП «Сатурн»

E-mail: chmil@nbi.com

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ МАЛЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

Описаны новые технологические решения и конструктивные подходы для проектирования радиометрической приемной системы для антенн малого диаметра. Сформулированы проблемы, которые необходимо преодолеть при реализации подобных систем. Подробно рассмотрены конкретные решения, которые прошли апробацию и предлагаются для реализации систем такого класса.

Ключевые слова: радиометрическая приемная система, антенна, хладопровод, волновод, $S/X/Ka$ -диапазон, преобразователь частоты.

В [1] описана радиометрическая приемная система (**РПС**), предназначенная для проведения радиоастрономических наблюдений за параметрами вращения Земли, определения всемирного времени, уровня моря, круговорота воды, состояния климата и текущей информации об угрозе стихийных бедствий. Эта система относится к интерферометрам нового поколения, размещаемых на радиотелескопах с антеннами малого диаметра — порядка 12–13 метров, как это классифицировано международной службой РСДБ (радиометрии со сверхдлинной базой).

Главной особенностью подобных комплексов является одновременный прием сигналов трех частот: S -диапазона (2,2–2,45 ГГц), X -диапазона (7,0–9,5 ГГц) и Ka -диапазона (28,0–34,0 ГГц) при двух (правой и левой) поляризациях. Для этого применяются, соответственно, трехдиапазонные облучатели с единым фазовым центром для формирования диаграмм направленности.

Подобные РПС уже реализованы на радиотелескопах Wettell (Германия), Бадары и Зеленчук (Россия) и в испано-португальском проекте RAEGE.

Поскольку существующая в радиоастрономии тенденция предполагает расширение парка радиотелескопов на базе антенн малого диаметра, в настоящей работе будут рассмотрены возникающие в таких проектах проблемы и показаны пути их разрешения.

РПС размещается под конусом антенны радиотелескопа (**рис. 1**). При этом трехдиапазонный $S/X/Ka$ -облучатель, разделители круговых поляризаций, вакуумноплотное радиопрозрачное окно и сверхмаломощные усилители всех трех диапазонов, а также некоторые другие элементы РПС размещаются в криостате, образуя единый криогенный приемный фокальный блок (**КПФБ**).

Хотя объем под антенной малого диаметра весьма ограничен, в нем кроме КПФБ и микроохладителя с хладопроводами необходимо разместить и обеспечивающее их работу оборудование. При этом плотность размещения узлов, блоков и соединителей РПС должна обеспечивать беспрепятственный доступ персонала к РПС для проведения профилактических или ремонтных работ в процессе эксплуатации радиотелескопа.

При создании РПС именно эти факторы стали причиной возникновения ряда конструктивно-технологических проблем, среди которых необходимо выделить следующие:

- использование надежного, оптимальных размеров криогенного охладителя и его присоединение к узлам КПФБ;
- обеспечение эффективного охлаждения входных усилителей и их СВЧ-трактов всех трех диапазонов, определяющих чувствительность РПС;



Рис. 1. Фотография антенны радиотелескопа с РПС

— реализация узлов и блоков *Ka*-диапазона, выполняемых на базе волноводов сечением 7,2×3,4 мм, с минимальными габаритами.

В целом РПС представляет собой жесткую конструкцию, закрепленную на верхнем фланце конической надзеркальной (выступающей над поверхностью зеркала антенны в ее центре) кабины с помощью специального элемента каркаса РПС — несущего фланца. Габаритный чертеж РПС представлен на **рис. 2**.

Внешние габариты части РПС, размещаемой выше несущего фланца, определяются размерами защитного кожуха: расстояние от плоскости присоединительного (несущего) фланца РПС до фазового центра облучателя КПФБ 1168 мм; диаметр защитного кожуха в плоскости несущего фланца 941 мм; диаметр защитного кожуха в плоскости радиопрозрачного окна КПФБ 490 мм. Высота РПС в сборе составляет 1600 мм.

Для обеспечения нормального функционирования РПС несовпадение оптической оси облучателя и оптической оси РПС не должно превышать 0,5°, а поперечное смещение центра облучателя должно быть не более ±0,5 мм.

Несущий фланец 3, присоединительный фланец 4, осевой цилиндр 5, защитный кожух 7 и вакуумноплотное радиопрозрачное окно 2 образуют каркас корпуса РПС, обеспечивающего теплоизоляцию аппаратуры РПС от окружающей среды при ее температуре до минус 40°С.

С целью минимизации размеров корпуса РПС, а также изоляции электронной аппаратуры от температуры внешней среды, на вну-

тренней поверхности защитного кожуха применено специальное теплоизоляционное покрытие TSM Ceramic [2] толщиной порядка 2 мм вместо 20—25 мм традиционно применяемых материалов, например пенопласта.

Следует отметить, что каркас является основным несущим элементом конструкции РПС, внутри которого размещены все электронные блоки, крепящиеся специальными кронштейнами к цилиндру, ориентированному по вертикальной оси РПС.

Ребра радиаторов всех радиоэлектронных блоков ориентированы сверху вниз, а за счет отбора воздуха из полости РПС со скоростью 5 м³/мин и воздуха, поступающего из надзеркальной кабины через промежуточный фланец, происходит отбор тепла со всех радиаторов. Кроме этого, для обеспечения стабильной работы электронной аппаратуры РПС в интервале рабочих температур от 5 до 40°С, применяются термоэлектрические батареи с электронными регуляторами температуры. Количество термоэлементов определяется массой термостабируемых блоков.

На несущем фланце РПС выполнены разъемные соединения гелиевого трубопровода высокого и низкого давления, вакуумного трубопровода, воздухопровода для обдува вакуумноплотного радиопрозрачного окна, а также различных типов кабелей — питающего напряжения сети (220 В, 50 Гц), сигналов синхронизации (100 МГц), СВЧ-соединителей, стандарта Ethernet, а также управления микрокриогенной системой.

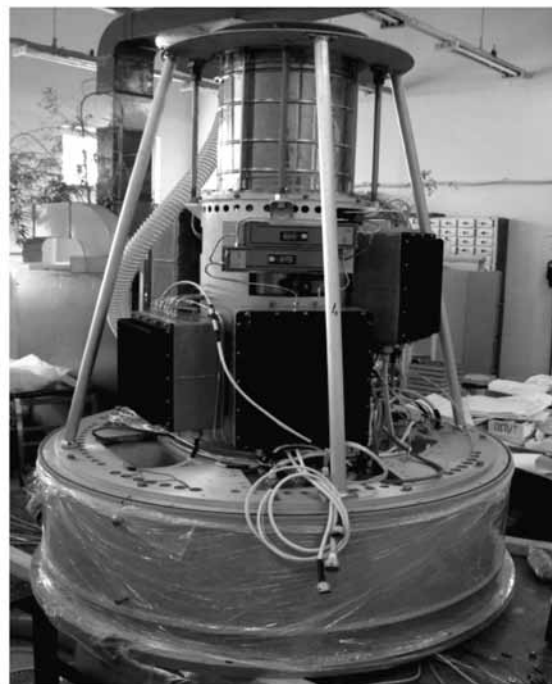
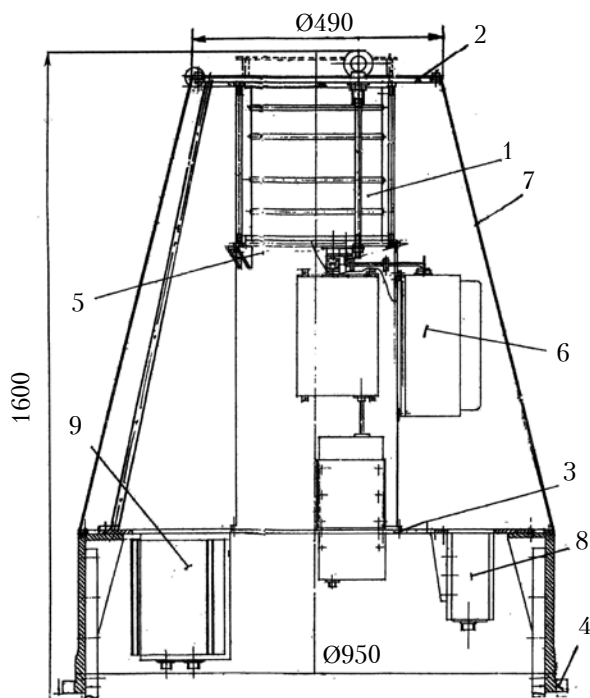


Рис. 2. Габаритный чертеж РПС и ее фото без защитного кожуха:

1 — КПФБ; 2 — радиопрозрачное окно; 3 — несущий фланец; 4 — присоединительный фланец; 5 — цилиндр; 6 — блок преобразования частоты *Ka*-диапазона (БПЧ-*Ka*); 7 — защитный кожух; 8 — блок питания, дистанционного контроля и управления КПФБ (БПДКУ-1); 9 — блок неохлаждаемых электронных блоков РПС (БПДКУ-2)

КПФБ, соединенный с микроохладителем (рис. 3), обеспечивает прием радиоастрономических сигналов, усиление их и выделение полюсов приема. Его корпус для минимизации массы и габаритов выполняется из тонкостенного (не более 0,8 мм) материала.

Для повышения жесткости установки КПФБ крепится специальными шпильками и подкосами соответственно к фланцу радиопрозрачного окна и несущему фланцу каркаса РПС. Для уменьшения теплопритоков используется провод с наименьшим коэффициентом теплопроводности WQL-32 [3], волноводы из нержавеющей стали с минимальной (0,3 мм) толщиной стенок и специальные кабели из нержавеющей стали. С этой же целью поверхности экрана и других деталей КПФБ доведены с помощью электрополировки до зеркального блеска.

Радиопрозрачное окно служит одновременно и верхним фланцем корпуса КПФБ. Именно под ним размещены облучатели $S/X/Ka$ -диапазонов, конструкции которых обеспечивают формирование и разделение круговых (левой и правой) поляризаций волн. Вакуумноплотное радиопрозрачное окно представляет собой фланец в виде кольца диаметром 480 мм, в центральное отверстие которого вклеена деталь специальной формы из пенопласта марки ПС-1-200 (ТУ6-05-1178-87), которая накрыта двумя слоями пленки: полиэтилентерефтолатом ПЭТ-7 (ГОСТ 24234-80) толщиной 0,02 мм и листовым фторопластом Ф-4 (ТУ 952467-93) толщиной 0,1 мм.

К каждому из трех облучателей $S/X/Ka$ -диапазонов подсоединен охлаждаемый до криогенных температур малошумящий усилитель (ОМШУ) соответствующего диапазона. При этом для снижения габаритов СВЧ-тракта

ОМШУ Ka -диапазона сотрудником Института радиоэлектроники НАН Украины В. Н. Скресановым была разработана уникальная скрутка волновода сечением 7,2×3,4 мм толщиной 2,3 мм. Это позволило уменьшить размеры волноводного тракта Ka -диапазона (примерно до 90 мм) и разместить все СВЧ-элементы, требующие криогенного охлаждения (в первую очередь, облучатели и ОМШУ), внутри экрана диаметром 244 мм.

Для реализации максимальной чувствительности РПС при приеме радиоастрономических сигналов необходимо с помощью микроохладителя обеспечить температуру ОМШУ, облучателей и волноводных элементов тракта Ka -диапазона на уровне 10 К. Каждое из этих устройств РПС охлаждается до криогенного уровня посредством хладопроводов (рис. 4), которые с целью создания наименьшего коэффициента теплового сопротивления в точках крепления к устройствам в обязательном порядке снабжены прокладками из индия (это мягкий и пластичный металл с высокой электро- и теплопроводностью, обладающий хорошей адгезией ко многим материалам; наиболее эффективный материал в данном случае). При этом для охлаждаемых элементов СВЧ-трактов необходимо минимизировать размеры их корпусов и изготавливать из материалов с максимально возможным коэффициентом теплопроводности.

Отдельно остановимся на проблеме реализации блока преобразования частоты (БПЧ) Ka -диапазона: если в S - и X -диапазонах (БПЧ- S и БПЧ- X), реализуемых на основе коаксиальных соединителей и кабелей, особых трудностей не возникает, то в случае БПЧ- Ka появляется сложность, вызванная необходимостью минимизации числа фланцев волноводных соединений,

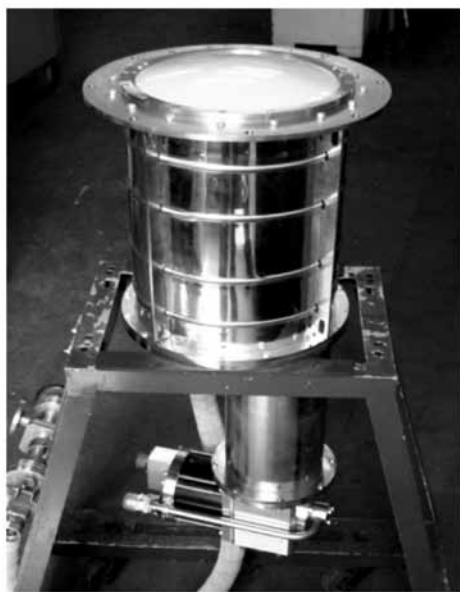


Рис. 3. Фотография КПФБ в сборе с микроохладителем на технологической подставке

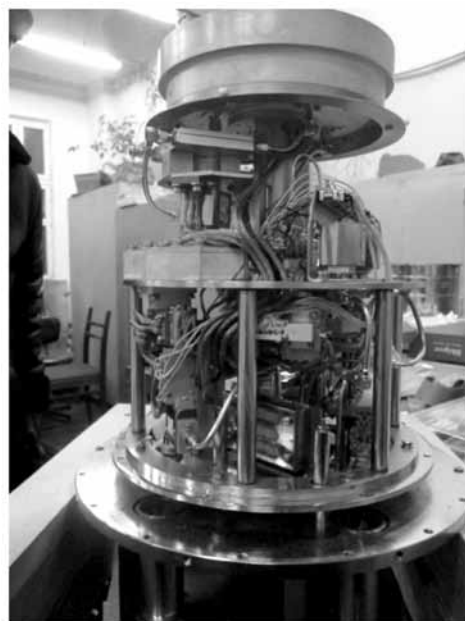


Рис. 4. Внутренний объем КПФБ с хладопроводами

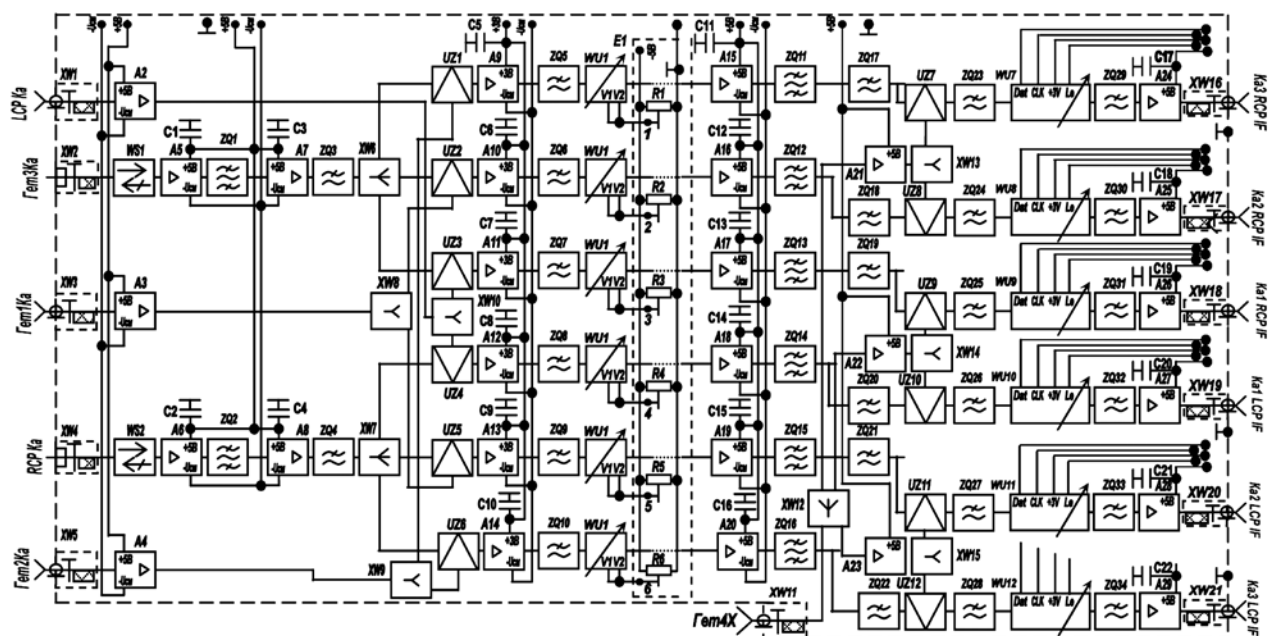


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема двухканального блока преобразования частоты *Ka*-диапазона

а также снижения массогабаритных характеристик этого блока.

БПЧ-*Ka* осуществляет преобразование принимаемых сигналов частотой 28,0–34,0 ГГц в сигналы с промежуточной частотой в диапазоне 1,0–2,0 ГГц.

Из приведенной на рис. 5 схемы БПЧ-*Ka* видно, что это СВЧ-устройство является двухканальным по входу (для правой и левой поляризации) и шестиканальным по выходу промежуточной частоты — по три выхода на каждую поляризацию, что обусловлено требованием минимальной неравномерности амплитудно-частотной характеристики канала промежуточной частоты при преобразовании сигнала из широкой полосы принимаемого радиоастрономического сигнала.

В каждом канале традиционная структура (входная маломощная часть, первое преобразование, узлы усиления и фильтрации первого преобразования, второе преобразование, узлы усиления и фильтрации второго преобразова-

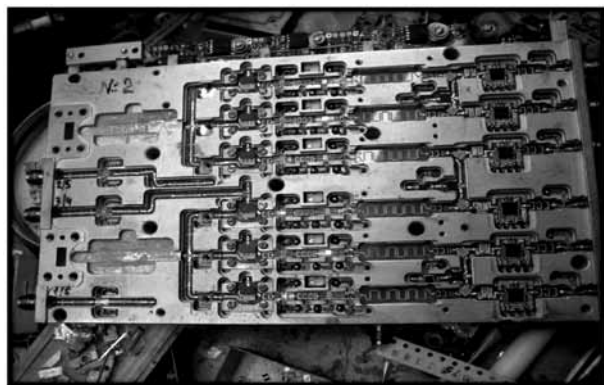


Рис. 6. Приемопреобразующий модуль *Ka*-диапазона

ния) дополняется полосно-пропускающим фильтром и фильтром ослабления второй гармоники.

Отметим, что такое схематическое решение приводит к наличию более чем 100 узлов, однако при традиционной, пюблочной, сборке (когда отдельные узлы соединяются между собой волноводными трактами и коаксиальными кабелями) подобное устройство будет иметь недопустимо большие для внутренних габаритов РПС массогабаритные характеристики.

В результате БПЧ-*Ka* был спроектирован как целостный модуль в виде двухэтажной конструкции, которая имеет множество микрополосковых СВЧ-переходов с одного этажа на другой, соединяющих отдельные узлы блока между собой, что позволило разместить в объеме 172×113×12,3 мм более 100 элементов. Фотография модуля, частично открытого со стороны сигнального тракта, приведена на рис. 6. Здесь видно, что между волноводным трактом и разделителем сигнала на три субканала находится входная маломощная часть, которая после настройки закрывается «радиогерметичными» крышками.

Преимуществом данной конструкции является отсутствие кабельных и волноводных соединений. При этом сигнальный вход приемника — волноводный, имеет сечение 7,2×3,4 мм, входы гетеродинов и выход сигнала промежуточной частоты — коаксиальные.

Заключение

Все конструктивные и технологические решения рассмотренных проблем, возникших при создании РПС для антенн малого диаметра, были не только апробированы на макетах, но и успешно реализованы в трех комплектах радиометрических систем современных радиоа-

строномических комплексов. Кроме того, описанный подход к решению указанных проблем рекомендован к широкому применению международной службой РСДБ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пилипенко А. М., Сундучков И. К., Чмил В. В. и др. Радиометрический приемный комплекс и пути снижения вносимой им погрешности в радиометрические измерения // Технология и конструирование в электронной ап-

паратуре. — 2015. — № 5–6. — С. 14–21. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.5-6.14>

2. Теплоизоляционный материал, www.tsmceramic.com.ua

3. Провод с низкой теплопроводностью. http://www.lakeshore.com/Documents/LSTC_wire_1.pdf

Дата поступления рукописи
в редакцию 05.04 2016 г.

Е. М. ГЛУШЕЧЕНКО, О. М. ПИЛИПЕНКО, Е. В. СЛОНІН,
І. К. СУНДУЧКОВ, В. В. ЧМІЛЬ

Україна, м. Київ, НВП «Сатурн»
E-mail: chmil@nbi.com

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ
ПРИЙМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МАЛИХ РАДІОТЕЛЕСКОПІВ

Наведено нові технологічні рішення та конструктивні підходи щодо проектування радіометричної приймальної системи радіоастрономії для антен малого діаметру. Сформульовано проблеми, які необхідно подолати при реалізації подібних систем. Детально розглянуто конкретні рішення, що пройшли апробацію та пропонуються для реалізації систем такого класу.

Ключові слова: радіометрична приймальна система, антена, холодопровід, хвилевід, S/X/Ka-діапазон, перетворювач частоти.

DOI: 10.15222/TKEA2016.2-3.21
UDC 621. 396. 677:621. 396. 965

Е. Н. GLUSCHECHENKO, А. М. PYLYPENKO,
Е. В. SLONIN, І. К. SUNDUCHKOV, V. V. CHMIL

Ukraine, Kyiv, “Saturn” Research and Development Company PJSC
E-mail: chmil@nbi.com

FEATURES OF STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS
FOR RECEIVING SYSTEM OF SMALL RADIO TELESCOPES

The article presents new technological solutions and structural approaches for design of radiometric receiving systems for small diameter antennas. Problems which need to be dealt with in the process of realization of such systems are formulated. All of the considered problems, both structural and technological, encountered when creating radiometric receiving systems for small diameter antennas, were not only tested on the mockups, but also successfully implemented in three sets of radiometric systems of modern radio astronomy facilities. In addition, the described approach to solving these problems is recommended for the wide application by the international VLBI service.

Keywords: radiometric receiving system, antenna, cold finger, waveguide, frequency transformer, S/X/Ka-range.

REFERENCES

1. Pylypenko A. M., Sunduchkov I. K., Chmil V. V., Chmil V. M., Yatsyk P. O. [Radiometric receiving complex and ways to reduce the radiometric measurements error]. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature,

2015, no. 5-6, pp. 14-21. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.5-6.14>

2. www.tsmceramic.com.ua

3. http://www.lakeshore.com/Documents/LSTC_wire_1.pdf

Д. т. н. Д. И. ЛЕХОВИЦКИЙ, к. т. н. В. П. РЯБУХА, Д. С. РАЧКОВ, А. В. СЕМЕНЯКА

Украина, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

E-mail: lekhovytskyidavid@gmail.com

РЕКУРРЕНТНЫЕ АЛГОРИТМЫ НАСТРОЙКИ АДАПТИВНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ ФИЛЬТРОВ

Проведен анализ алгоритмов коррекции параметров адаптивных решетчатых фильтров (АРФ) для K -ранговой модификации оценочной корреляционной матрицы в «скользящем» по времени (дальности) окне данных при $K \geq 1$. Рассмотрены недостатки методов коррекции параметров АРФ, основанных на K -кратном использовании известных алгоритмов одноранговой модификации. Предложен комбинированный алгоритм K -ранговой модификации, уже однократное использование которого решает задачу коррекции параметров АРФ в указанных условиях. Показано, что он снижает вычислительную сложность и повышает численную устойчивость процедуры коррекции параметров АРФ по сравнению с методами, основанными на алгоритмах одноранговой модификации.

Ключевые слова: пространственно-временная обработка сигналов; адаптивный решетчатый фильтр; обобщенная факторизация Левинсона; сомножители Холецкого; частный коэффициент корреляции; комбинированный алгоритм.

Адаптивные решетчатые фильтры (АРФ) являются эффективным средством решения широкого круга задач пространственно-временной обработки сигналов в различных радиотехнических системах в реальных условиях параметрической априорной неопределенности [1–4]. Их достоинства связаны, в частности, с тем, что предписываемые алгоритмами обработки различные функции корреляционной матрицы (КМ) входных воздействий (в том числе — матрицы, обратной ей) в АРФ формируются не по явно сформированным оценкам соответствующих матриц, а по их сомножителям обобщенной факторизации Левинсона (ОФЛ) [4].

Важнейший этап адаптивной обработки на основе АРФ — его настройка, в процессе которой должны устанавливаться такие параметры сомножителей (ступеней АРФ), при которых их произведение (не формируемое явно) удовлетворяет заданному требованию. Для большинства применений это произведение должно быть пропорционально матрице, обратной используемой оценке КМ или той или иной ее аппроксимации [5, 6]. В свою очередь базовая оценка КМ часто строится по обучающей выборке, элементы которой расположены во временном «окне» конечной протяженности. В достаточно типичных для практики условиях входных воздействий, стационарных только на ограниченном временном интервале, это окно «скользит» по времени (в рассматриваемых далее радиолокационных приложениях — по дальности). В этом случае обучающая выборка для каждого следующего элемента дальности частично обновляется по сравнению

с предыдущей за счет выхода из ее состава «старых» и входа «новых» элементов. Такое только частичное обновление выборки позволяет «перенастроить» АРФ для следующего элемента дальности с затратами, меньшими, чем при пересчете его параметров по новой выборке полного объема, которые могут быть нецелесообразны или даже практически недопустимы.

Используемая оценка КМ для $(n+1)$ -го элемента дальности часто представляет собой сумму $\hat{\Phi}(n+1) = \hat{\Phi}(n) + \Phi_K$ оценки $\hat{\Phi}(n)$ КМ для n -го элемента и модифицирующей матрицы $\Phi_K = \sum_{i=1}^K \Phi_i$ ранга $r = K \geq 1$, образован-

ной суммой K матриц Φ_i , $i \in 1, K$, единичного ранга. Очевидно, что в этих случаях сомножители ОФЛ обратной матрицы для «перенастройки» АРФ в принципе можно получить путем K -кратной модификации матриц $\Phi_{mod}(i) = \Phi_{mod}(i-1) + \Phi_i$, $i \in 1, K$, $\Phi_{mod}(0) = \hat{\Phi}(n)$ матрицами Φ_i ранга $r = 1$. Различные алгоритмы коррекции параметров (перенастройки) АРФ на основе одноранговой модификации оценок сомножителей ОФЛ треугольных матриц Холецкого приведены и рекомендованы для практического использования в [1–4, 7].

Возможен, однако, принципиально другой путь, предполагающий не K -кратную коррекцию параметров АРФ по алгоритмам одноранговой модификации ОФЛ, а их однократный пересчет по алгоритмам K -ранговой модификации. Такой путь должен уменьшать вычислительную

сложность процедуры настройки и повышать ее численную устойчивость, поскольку в этом случае не должны накапливаться ошибки, возникающие в каждом из K циклов одноранговой модификации. Настоящая работа посвящена синтезу алгоритмов, реализующих такой подход, и демонстрации их преимуществ по сравнению с традиционными.

«Математика» решетчатых фильтров

Математические соотношения, описывающие решетчатый фильтр (РФ), продемонстрированы на примере приведенного на рис. 1 четырехвходового ($M=4$) «параллельного» (пространственного) РФ [4–7]. (Используемые в статье в качестве индексов символы « T », « $*$ », « $+$ » обозначают транспонирование, комплексное сопряжение и эрмитово сопряжение (сопряжение и транспонирование) соответственно.

В РФ на этапе инициализации N -мерные строки $\mathbf{u}_l^* = \{u_{li}\}_{i=1}^N = \mathbf{e}_l^{(M)*} \cdot \mathbf{U}$ входной $M \times N$ матрицы $\mathbf{U} = \{u_{li}\}_{l=1, i=1}^{M, N}$ умножаются на скалярные множители $s_l(l)$, $l \in 1, M$, образуя M пар N -мерных входных векторов — строк

$$\mathbf{p}_l^+ (l) = \mathbf{q}_l^+ (l) = s_l (l) \cdot \mathbf{u}_l^+, \quad l \in 1, M \quad (1)$$

для последующих ступеней РФ.

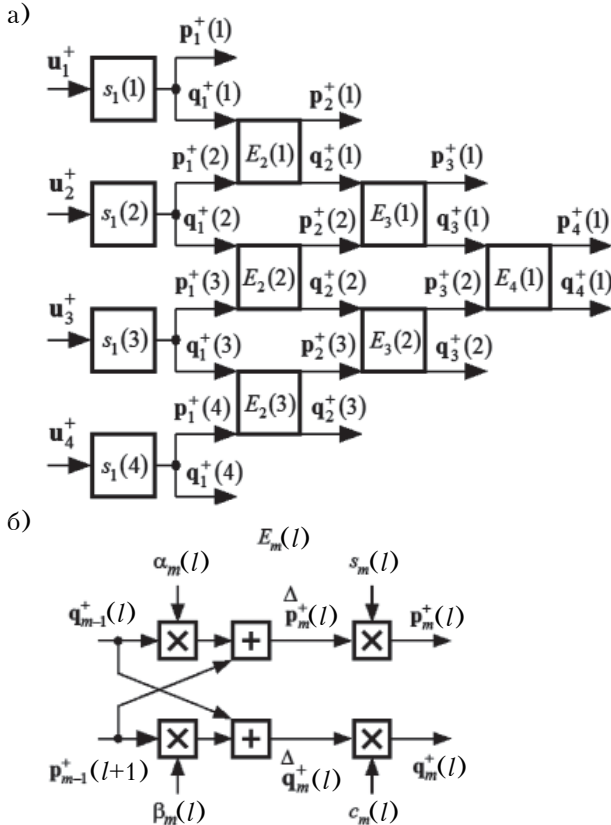


Рис. 1. «Параллельный» четырехвходовый РФ (a) и образующие его ЭРФ (б)

Здесь и ниже $\mathbf{e}_l^{(L)+}$ означает l -ю, $l \in 1, L$, строку $L \times L$ единичной матрицы $\mathbf{I}_L$.

В m -й, $m \in 2, M$, ступени РФ (рис. 1, a) входные векторы $\mathbf{p}_{m-1}^*(l+1)$, $\mathbf{q}_{m-1}^*(l)$ l -го, $l \in 1, M+1-m$, элементарного РФ (ЭРФ) (рис. 1, б) преобразуются в его выходные векторы:

$$\begin{cases} \mathbf{p}_m^+ (l) = s_m (l) \cdot \mathbf{p}_m^+ (l); \\ \mathbf{q}_m^+ (l) = c_m (l) \cdot \mathbf{q}_m^+ (l), \end{cases} \quad (2)$$

где $m \in 2, M$; $l \in 1, M+1-m$;

$$\mathbf{p}_m^+ (l) = \mathbf{p}_{m-1}^+ (l+1) + \alpha_m (l) \cdot \mathbf{q}_{m-1}^+ (l);$$

$$\mathbf{q}_m^+ (l) = \mathbf{q}_{m-1}^+ (l) + \beta_m (l) \cdot \mathbf{p}_{m-1}^+ (l+1).$$

Определяющими параметрами ЭРФ этих ступеней РФ являются

$$s_m(l), c_m(l), \alpha_m(l), \beta_m(l), \quad (3)$$

где $m \in 2, M$, $l \in 1, M+1-m$.

Нетрудно убедиться, что при любых значениях множителей $s_l(l)$, $l \in 1, M$, первой ступени РФ и параметров (3) ЭРФ его последующих ступеней полная совокупность приведенных выше операций преобразует входную $M \times N$ матрицу

$$\mathbf{U} \text{ в } 2M \times N \text{ выходную матрицу } \mathbf{W} \cdot \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} \text{ с } M \times N \text{ подматрицами}$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{U} = \{ \mathbf{p}_m^+ (1) \}_{m=1}^M, \quad (4)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{N}^+ \cdot \mathbf{U} = \{ \mathbf{q}_{M+1-m}^+ (m) \}_{m=1}^M,$$

где $\mathbf{H}$ и $\mathbf{N}^+$ — нижняя и верхняя $M \times M$ треугольные матрицы,

$$\mathbf{H} = \{ h_{ij} \}_{i,j=1}^M, \quad h_{ij} = 0, i < j; \quad (5)$$

$$\mathbf{N}^+ = \{ n_{ij} \}_{i,j=1}^M, \quad n_{ij} = 0, i > j.$$

Матрицы $\mathbf{H}$ и $\mathbf{N}^+$, определяют матричную импульсную характеристику (МИХ) РФ на рис. 1 в целом:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & & \\ \mathbf{H} & & \\ & \mathbf{N}^+ & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Наиболее важные применения АРФ относятся к заданию таких значений множителей $s_l(l)$, $l \in 1, M$, и параметров (3) его ЭРФ, при которых треугольные матрицы (не формируемые явно) $\mathbf{H}$ и $\mathbf{N}^+$ являются сомножителями Холецкого матрицы $\hat{\Psi} = \{ \omega_{ij} \}_{i,j=1}^M = \hat{\Phi}^{-1}$, обратной используемой неотрицательно определенной эрмитовой матрице — оценке $\hat{\Phi} = \{ \phi_{ij} \}_{i,j=1}^M$ априори неизвестной КМ Φ входного процесса, т. е. удовлетворяют равенствам

$$\mathbf{H}^+ \cdot \mathbf{H} = \hat{\Psi} = \mathbf{N}^+ \cdot \mathbf{N}, \quad (7)$$

$$\hat{\Psi} = \{ \omega_{ij} \}_{i,j=1}^M = \hat{\Phi}^{-1}.$$

Для эрмитовой оценки $\hat{\Phi}=\hat{\Phi}^+$ параметры ЭРФ (3) связаны равенствами

$$\beta_m(l) = \alpha_m^*(l), \quad c_m(l) = s_m(l), \quad (8)$$

где $m \in 2, M$; $l \in 1, M+1-m$.

Кроме того, в этом случае действительные нормирующие множители $c_m(l) = s_m(l)$ однозначно определяются значениями «частных коэффициентов корреляции» $\alpha_m(l)$ [1–4]. Поэтому для настройки АРФ (рис. 1) с МИХ (6), удовлетворяющей равенству (7) для эрмитовой оценки КМ, достаточно определить параметры

$$s_1(l), \quad \text{где } l \in 1, M; \quad (9)$$

$$\alpha_m(l), \quad \text{где } m \in 2, M, \quad l \in 1, M+1-m.$$

Для немодифицированной оценки КМ приведем базовый алгоритм определения параметров (8), (9) для условий (7), использующийся для их K -ранговой модификации.

Базовый немодифицированный алгоритм настройки АРФ

Базовым в [4] назван алгоритм настройки АРФ по корню $\mathbf{U} = \{u_{li}\}_{l=1, i=1}^{M, N}$ используемой оценки КМ вида

$$\hat{\Phi} = \{\phi_{ij}\}_{i,j=1}^M = \mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\lambda} \cdot \mathbf{U}^+, \quad (10)$$

$$\mathbf{U} = \{u_{li}\}_{l=1, i=1}^{M, N},$$

где $\boldsymbol{\lambda} = \text{diag}\{\lambda_i\}_{i=1}^N$, $\lambda_i \neq 0$ — невырожденная $N \times N$ диагональная матрица, в частности $N \times N$ единичная матрица $\mathbf{I}_N$.

Такое задание достаточно типично, особенно для адаптивных систем (пространственной, временной, пространственно-временной) обработки гауссовых входных воздействий. В них широко используется оценка максимального правдоподобия (МП-оценка)

$$\hat{\Phi} = \hat{\Phi}_g = T^{-1} \cdot \mathbf{A}, \quad (11)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^+ = \sum_{i=1}^T \mathbf{y}_i \cdot \mathbf{y}_i^+$$

априори неизвестной КМ Φ общего вида, построенная по выборке $\mathbf{Y} = \{\mathbf{y}_i\}_{i=1}^T$ объема T гауссовых взаимно независимых M -мерных векторов комплексных амплитуд выходных сигналов M каналов приема

$$\mathbf{y}_i = \{y_l^{(i)}\}_{l=1}^M \sim CN(0, \Phi), \quad \overline{\mathbf{y}_i \cdot \mathbf{y}_j^+} = \begin{cases} \Phi, & i = j, \\ \mathbf{0}, & i \neq j, \end{cases} \quad (12)$$

где $i, j \in 1, T$.

Для этой оценки

$$\mathbf{U} = \mathbf{Y}; \quad \boldsymbol{\lambda} = T^{-1} \cdot \mathbf{I}_T; \quad N = T. \quad (13)$$

В условиях (12) МП-оценкой эрмитовой пересимметричной (симметричной относительно побочной диагонали) КМ Φ является матрица [4]

$$\hat{\Phi} = \hat{\Phi}_{pers} = (2T)^{-1} \mathbf{A}_{pers}, \quad (14a)$$

где $\mathbf{A}_{pers} = \mathbf{A} + \mathbf{J} \cdot \mathbf{A}^* \cdot \mathbf{J}$, для которой

$$\mathbf{U} = [\mathbf{Y}, \mathbf{J} \cdot \mathbf{Y}^*]; \quad \boldsymbol{\lambda} = (2T)^{-1} \cdot \mathbf{I}_{2T}; \quad N = 2T, \quad (14b)$$

где $\mathbf{J}$ — $M \times M$ матрица перестановок с единицами на побочной диагонали.

Для предложенных и исследованных Ю. И. Абрамовичем диагонально-регуляризованных (*diagonally loaded*) вариантов этих оценок [8]

$$\hat{\Phi} = \hat{\Phi}_{g \, dl} = T^{-1} (\beta_{dl} \mathbf{I}_M + \mathbf{A}),$$

$$\hat{\Phi} = \hat{\Phi}_{pers \, dl} = (2T)^{-1} (\beta_{pers} \mathbf{I}_M + \mathbf{A}_{pers}), \quad (15)$$

где $\beta_{dl} > 0$, $\beta_{pers} > 0$, сомножители (10), очевидно, равны

$$\mathbf{U} = [\sqrt{\beta_{dl}} \cdot \mathbf{I}_M, \mathbf{Y}], \quad (16a)$$

$$\boldsymbol{\lambda} = T^{-1} \cdot \mathbf{I}_{M+T}; \quad N = M + T;$$

$$\mathbf{U} = [\sqrt{\beta_{pers}} \cdot \mathbf{I}_M, \mathbf{Y}, \mathbf{J} \cdot \mathbf{Y}^*], \quad (16b)$$

$$\boldsymbol{\lambda} = (2T)^{-1} \cdot \mathbf{I}_{M+2T}; \quad N = M + 2T.$$

В условиях (10) базовый алгоритм адаптивной настройки АРФ имеет следующий вид:

— инициализация ($m = 1$) при $l \in 1, M$:

$$\mathbf{u}_l^+ = \mathbf{e}_l^{(M)+} \cdot \mathbf{U}, \quad \phi_{ll} = \mathbf{u}_l^+ \cdot \boldsymbol{\lambda} \cdot \mathbf{u}_l, \quad (17a)$$

$$s_1(l) = 1/\sqrt{\phi_{ll}}, \quad (17b)$$

$$\mathbf{p}_1^+(l) = \mathbf{q}_1^+(l) = s_1(l) \cdot \mathbf{u}_l^+; \quad (17b)$$

— настройка АРФ (расчет параметров ЭРФ в его ступенях, $m \in 2, M$) при $l \in 1, M-m$:

$$\alpha_{m+1}(l) = -\mathbf{p}_m^+(l+1) \cdot \boldsymbol{\lambda} \cdot \mathbf{q}_m(l), \quad (18a)$$

$$\begin{cases} \mathbf{p}_{m+1}^+(l) = \mathbf{p}_m^+(l+1) + \alpha_{m+1}(l) \cdot \mathbf{q}_m^+(l), \\ \mathbf{q}_{m+1}^+(l) = \mathbf{q}_m^+(l) + \alpha_{m+1}^*(l) \cdot \mathbf{p}_m^+(l+1), \end{cases} \quad (18b)$$

$$g = \mathbf{p}_{m+1}^+(l) \cdot \boldsymbol{\lambda} \cdot \mathbf{p}_{m+1}^+(l), \quad s_{m+1}(l) = \frac{1}{\sqrt{g}}, \quad (18b)$$

$$\begin{cases} \mathbf{p}_{m+1}^+(l) = s_{m+1}(l) \cdot \mathbf{p}_{m+1}^+(l), \\ \mathbf{q}_{m+1}^+(l) = s_{m+1}(l) \cdot \mathbf{q}_{m+1}^+(l). \end{cases} \quad (18g)$$

Формулы этого алгоритма используются далее в качестве аналогов при выводе алгоритмов K -ранговой модификации параметров АРФ, которые зависят и от вида модифицирующей матрицы.

Перейдем к обоснованию структуры модифицирующей матрицы, для которой затем будут синтезированы алгоритмы K -ранговой модификации.

Структура модифицирующей матрицы

На рис. 2 схематично показан пример организации адаптивной проверки гипотез о наличии или отсутствии импульсного полезного сигнала, маскируемого протяженной по дальности помехой, при обработке M -мерных векторов комплексных амплитуд y_i , $i \in 1, N + 2c + 1$, выходных сигналов M каналов приема в «скользящем» по времени (дальности) $(N + 2c + 1)$ -элементном окне.

На рис. 2, а на наличие сигнала в момент времени $t = t_n$ проверяется центральный вектор (черная стрелка). В обучающую выборку помехи объемом $N = 2k$ для этого момента входят векторы (светлые стрелки), по k с каждой стороны от центрального. Чтобы исключить влияние ближних боковых лепестков сигнала после согласованной обработки в приемнике, в обучающую выборку помехи не входят $2c$ векторов, примыкающих к «сигнальному» (в данном примере $c = 1$; показаны пунктиром).

На рис. 2, б показана входная выборка для следующего элемента дальности. Здесь проверяемому на наличие сигнала вектору соответствует момент времени $t = t_n + 1$, а «сигнальными» считаются и примыкающие к нему векторы, показанные пунктирными стрелками. В эту обучающую выборку входят векторы «старой» выборки (светлые стрелки), за исключением тех, что отмечены на рис. 2, а знаком «-», и два «новых» вектора (серые стрелки).

При такой организации обработки МП-оценка КМ помехи $\hat{\Phi}_{t_n+1}$ (11), как и ее диагонально регуляризованный вариант (15), для момента $t = t_n + 1$ связаны с оценкой $\hat{\Phi}_{t_n}$ для $t = t_n$ равенством

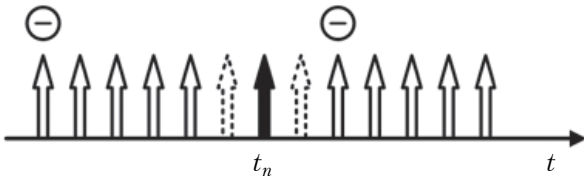
$$\hat{\Phi}_{t_n+1} = \hat{\Phi}_{t_n} + \sum_{i=1}^{K_g} (-1)^i \mathbf{f}_{gi} \mathbf{f}_{gi}^+ = \hat{\Phi}_{t_n} + \mathbf{F}_g \cdot \mathbf{\Lambda}_g \cdot \mathbf{F}_g^+, \quad (19)$$

где $K_g = 4$;

$$\mathbf{f}_{g1} = \mathbf{y}_{t_n-c-k}; \quad \mathbf{f}_{g2} = \mathbf{y}_{t_n-c};$$

$$\mathbf{f}_{g3} = \mathbf{y}_{t_n+c+1}; \quad \mathbf{f}_{g4} = \mathbf{y}_{t_n+c+k+1};$$

а)



б)

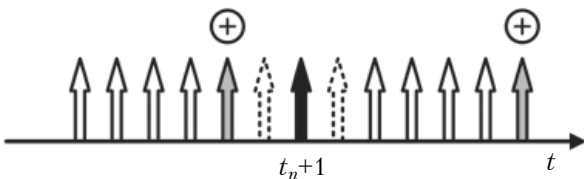


Рис. 2. Структура обучающей выборки в двух смежных элементах дальности

$$\mathbf{F}_g = \{ \mathbf{f}_{gi} \}_{i=1}^{K_g};$$

$$\mathbf{\Lambda}_g = \text{diag} \{ (-1)^i \}_{i=1}^{K_g}.$$

Каждое слагаемое под знаком суммы в (19) является матрицей единичного ранга, так что оценки (11), (15) КМ помехи для момента $t = t_n + 1$ являются результатом четырехранговой модификации этих оценок для момента $t = t_n$.

Модифицированные оценки (14) персимметричных КМ для момента $t = t_n + 1$ также имеют вид (19), но с модифицирующими матрицами

$$\mathbf{F}_{pers} = [\mathbf{F}_g, \mathbf{J} \cdot \mathbf{F}_g^*], \quad \mathbf{\Lambda}_{pers} = \text{diag} \{ (-1)^l \}_{l=1}^{K_{pers}}, \quad (20)$$

где $K_{pers} = 2K_g = 8$, и, следовательно, являются результатом 8-ранговой модификации соответствующих оценок для момента $t = t_n$.

Ниже приведем алгоритмы модификации параметров АРФ, обеспечивающие выполнение равенств (5), (7) для модифицированной матрицы вида

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi} &= \{ \tilde{\Phi}_{ij} \}_{i,j=1}^M = \\ &= \Phi + \mathbf{F} \cdot \mathbf{\Lambda} \cdot \mathbf{F}^+ = \tilde{\mathbf{U}} \cdot \tilde{\boldsymbol{\lambda}} \cdot \tilde{\mathbf{U}}^+; \\ \tilde{\mathbf{U}} &= [\mathbf{U}, \mathbf{F}]; \quad \tilde{\boldsymbol{\lambda}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{\Lambda} \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\mathbf{U} = \{ \mathbf{u}_i \}_{i=1}^N; \quad \mathbf{F} = \{ \mathbf{f}_i \}_{i=1}^K;$$

$$\mathbf{\Lambda} = \text{diag} \{ (-1)^i \}_{i=1}^K = \mathbf{\Lambda}^{-1};$$

$$\boldsymbol{\lambda} = \text{diag} \{ \lambda_i \}_{i=1}^N; \quad \mathbf{\Lambda}^2 = \mathbf{I}_K.$$

с модифицирующей матрицей $\mathbf{F} \cdot \mathbf{\Lambda} \cdot \mathbf{F}^+$ произвольного ранга $K \geq 1$.

Модифицированные параметры АРФ будем обозначать

$$\tilde{s}_1(l), \quad \text{где } l \in 1, M; \quad (22)$$

$$\tilde{\alpha}_m(l), \quad \tilde{s}_m(l), \quad \text{где } m \in 2, M, \quad l \in 1, M+1-m,$$

и для простоты называть «новыми». Они выражаются через «старые» параметры (8), (9), соответствующие требованиям (7) для «старой» матрицы Φ , и полагаются известными, а также через результаты преобразования модифицирующих матриц $\mathbf{F}$ и $\mathbf{\Lambda}$ в ступенях АРФ. «Новые» параметры анализируемого элемента дальности становятся «старыми» для ее следующего элемента.

Комбинированный алгоритм K -ранговой модификации

Операции синтезируемого алгоритма строятся по аналогии с операциями базового алгоритма (17), (18), но для условий (21).

На этапе инициализации определяются диагональные элементы матрицы (21)

$$\tilde{\varphi}_{ll} = \varphi_{ll} + \mathbf{f}_l^+ \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{f}_l, \quad (24a)$$

где $\mathbf{f}_l^+ = \mathbf{e}_l^{(M)+} \cdot \mathbf{F}$; $l \in 1, M$.

После этого по аналогии с (176) вычисляются «новые» множители первой ступени

$$\tilde{s}_1(l) = 1/\sqrt{\tilde{\varphi}_{ll}}, \quad l \in 1, M, \quad (24б)$$

и вспомогательные скаляры

$$\begin{aligned} v_1(l) &= r_1(l) = \\ &= s_1(l) \cdot \varphi_{ll} \cdot \tilde{s}_1(l), \quad l \in 1, M. \end{aligned} \quad (24в)$$

Кроме того, здесь формируются K -мерные ($K \geq 1$) входные векторы l -го, $l \in 1, M$, ЭРФ второй ступени «старого» и «нового» АРФ, соответственно, завершающие процедуру инициализации:

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_1^+(l) &= \mathbf{g}_1^+(l) = s_1(l) \cdot \mathbf{f}_l^+ \cdot \mathbf{A}, \\ \tilde{\mathbf{p}}_1^+(l) &= \tilde{\mathbf{q}}_1^+(l) = \tilde{s}_1(l) \cdot \mathbf{f}_l^+. \end{aligned} \quad (24г)$$

На этапе настройки $(m+1)$ -й, $m \in 1, M_{sh}$ ($M_{sh} \leq M-1$), ступени АРФ вначале по значениям вспомогательных скаляров $v_m(l)$, $r_m(l)$ и K -мерных ($K \geq 1$) входных векторов $\mathbf{t}_m^+(l)$, $\mathbf{g}_m^+(l)$ и $\tilde{\mathbf{p}}_m^+(l)$, $\tilde{\mathbf{q}}_m^+(l)$ ЭРФ «старого» и «нового» АРФ вычисляются «новые» частные коэффициенты корреляции $|\tilde{\alpha}_{m+1}(l)| < 1$ и нормирующие множители $\tilde{s}_{m+1}(l)$, $l \in 1, M-m$. На их основе по формулам, аналогичным (18б), (18г), вычисляются выходные K -мерные ($K \geq 1$) векторы этих ЭРФ и вспомогательные скаляры $v_{m+1}(l)$ и $r_{m+1}(l)$, необходимые для настройки следующей ступени обоих АРФ.

В большинстве случаев число настраиваемых ступеней $M_{sh} + 1 < M$, в связи с чем матрицы $\mathbf{H}$ и $\mathbf{N}^+$ в (6) являются ленточными с шириной ленты $M_{sh} + 1$. В этом случае не только уменьшается объем вычислений, но и при определенных условиях может повышаться эффективность адаптивной обработки в целом [5].

Возможны различные способы реализации описанного алгоритма, в частности, основанные на использовании только «старых» или только «новых» АРФ. Такие алгоритмы хорошо известны для случая одноранговой ($K = 1$) модификации [1–3], однако при $K > 1$ их K -ранговые аналоги резко усложняются по мере роста K . В этих условиях наиболее приемлем именно «комбинированный» алгоритм (КА) на основе как «старых», так и «новых» АРФ. Поскольку описание его вывода слишком громоздко, приведем собственно алгоритм настройки l -го элемента РФ $(m+1)$ -й ступени ($l \in 1, M-m$; $m \in 1, M_{sh}$) «старого» и «нового» АРФ, выполняемый после инициализации (24):

$$sk = \mathbf{t}_m^+(l+1) \cdot \tilde{\mathbf{q}}_m(l); \quad (25a)$$

$$\begin{cases} \mathbf{t}_{m+1}^+(l) = s_{m+1}(l) (\mathbf{t}_m^+(l+1) + \\ \quad + \alpha_{m+1}(l) \cdot \mathbf{g}_m^+(l)), \\ \mathbf{g}_{m+1}^+(l) = s_{m+1}(l) (\mathbf{g}_m^+(l) + \\ \quad + \alpha_{m+1}^*(l) \cdot \mathbf{t}_m^+(l+1)); \end{cases} \quad (25б)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}_{m+1}(l) &= r_m(l+1) \times \\ &\times (v_m(l) \cdot \alpha_{m+1}(l) + sk); \end{aligned} \quad (25в)$$

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{p}}_{m+1}^+(l) = \tilde{\mathbf{p}}_m^+(l+1) + \\ \quad + \tilde{\alpha}_{m+1}(l) \cdot \tilde{\mathbf{q}}_m^+(l), \\ \tilde{\mathbf{q}}_{m+1}^+(l) = \tilde{\mathbf{q}}_m^+(l) + \\ \quad + \tilde{\alpha}_{m+1}^*(l) \cdot \tilde{\mathbf{p}}_m^+(l+1); \end{cases} \quad (25г)$$

$$sk = \mathbf{g}_{m+1}^*(l) \cdot \tilde{\mathbf{q}}_{m+1}^+(l); \quad (25д)$$

$$\begin{aligned} \chi &= [v_m(l) \times \\ &\times (v_m(l) - s_{m+1}(l) \cdot sk)]^{-0,5}; \end{aligned} \quad (25е)$$

$$\tilde{s}_{m+1}(l) = \chi \cdot s_{m+1}(l); \quad (25ж)$$

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{p}}_{m+1}^+(l) = \tilde{s}_{m+1}(l) \cdot \tilde{\mathbf{p}}_{m+1}^+(l), \\ \tilde{\mathbf{q}}_{m+1}^+(l) = \tilde{s}_{m+1}(l) \cdot \tilde{\mathbf{q}}_{m+1}^+(l); \end{cases} \quad (25з)$$

$$\begin{cases} v_{m+1}(l) = \chi \cdot v_m(l), \\ r_{m+1}(l) = \chi \cdot r_m(l+1). \end{cases} \quad (25и)$$

Схема комбинированного алгоритма K -ранговой модификации параметров ЭРФ $(m+1)$ -й ступени АРФ при $K > 1$ приведена на рис. 3. Здесь в «старом» и «новом» АРФ по формулам (25б), (25г), (25з) рекуррентно формируются

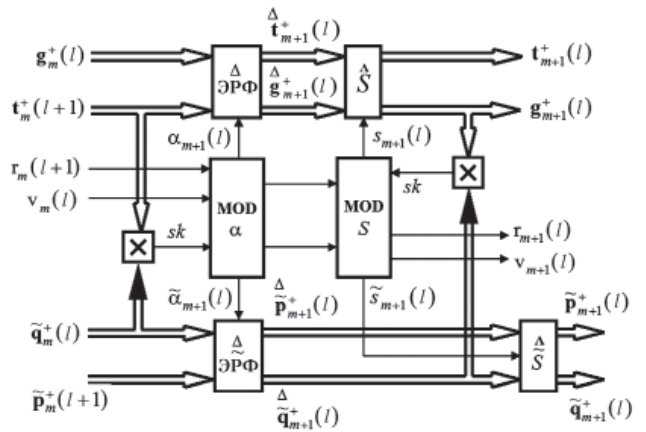


Рис. 3. Комбинированный алгоритм K -ранговой модификации параметров ЭРФ

K -мерные векторы $\mathbf{t}_{m+1}^+(l)$, $\mathbf{g}_{m+1}^+(l)$ и $\tilde{\mathbf{p}}_{m+1}^+(l)$, $\tilde{\mathbf{q}}_{m+1}^+(l)$, начальные значения которых сформированы по формуле (24г) на этапе инициализации.

Блоки модификации частных коэффициентов корреляции (MOD α) и нормирующих множителей (MOD s) реализуют операции (25в) и (25ж) с использованием скалярных произведений (25а) и (25д) K -мерных входных и выходных векторов ЭРФ модифицируемой ступени обоих АРФ. Связанные с этим вычислительные затраты не выше, чем при K -кратном использовании алгоритмов однократной модификации. Однако операции в этих блоках, составляющие значительную долю общего объема операций, выполняются за полный цикл модификации параметров соответствующего элемента дальности не K , а один раз. В связи с этим вычислительная сложность комбинированного алгоритма K -ранговой модификации при $K > 1$ в целом заметно меньше, чем K -кратное использование алгоритмов однократной модификации. По этой же причине в реальных условиях конечной разрядности вычислений КА и более точен, поскольку при его использовании не накапливаются ошибки, возникающие в каждом из K циклов одноранговой модификации.

Некоторые результаты экспериментальной проверки комбинированного алгоритма K -ранговой модификации параметров АРФ

К настоящему времени алгоритм прошел обширную проверку в ходе моделирования и полунатурных испытаний, в основном в адаптивных системах междупериодной обработки сигналов. Приведем результаты некоторых из них.

На рис. 4 приведен пример работы системы селекции движущихся целей (СДЦ) на основе АРФ с КА K -ранговой модификации параметров по записям реальных сигналов с выхода амплитудного детектора некогерентной РЛС 8-мм диапазона [9]. Показан вид экрана амплитудного индикатора (двухлучевого осциллографа) с отражениями от гидрометеоров (дождевых облаков, тумана) в рабочем строке РЛС, на фоне которых цель при выключенном АРФ не обнаруживается (верхний луч), но уверенно обнаруживается при его включении (нижний луч).



Рис. 4. Пример работы системы СДЦ на основе АРФ с комбинированным алгоритмом модификации

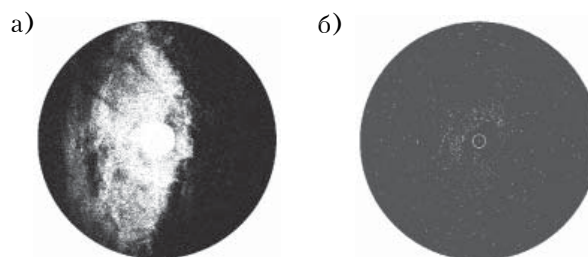


Рис. 5. Вид экрана ИКО при выключенном (а) и включенном (б) АРФ

В этом эксперименте размер обрабатываемой пачки $M = 18$, объем обучающей выборки $N = 20$, ранг модифицирующей матрицы $K = 4$. Временные затраты КА оказались примерно втрое меньше, а точность модификации заметно выше, чем четырехкратное применение алгоритмов одноранговой модификации, что полностью подтверждает теоретические выводы.

Аналогичные результаты получены при полунатурных испытаниях системы СДЦ на основе АРФ с КА четырехранговой модификации в аэродромной РЛС 10-см диапазона, расположенной в зоне аэропорта с интенсивным воздушным движением. Вид экрана индикатора кругового обзора (ИКО) этой РЛС в пасмурный день показан на рис. 5, а. Мощные отражения от грозových облаков в этих условиях полностью маскируют сигналы многочисленных воздушных целей. Включение АРФ практически очистило экран ИКО от этих отражений (рис. 5, б), что позволило обнаружить точечные объекты, а после пороговой и траекторной обработки — классифицировать их.

АРФ с КА K -ранговой модификации при $K > 1$ использовался и в целом ряде других экспериментов, в частности при решении различных задач междупериодной обработки сигналов в импульсном доплеровском метеолокаторе С-диапазона. Их результаты, достаточно подробно описанные в [9, 10], подтвердили его работоспособность и высокую эффективность.

Заключение

Проведенные исследования показали, что синтезированный комбинированный алгоритм K -ранговой модификации параметров АРФ при $K > 1$ решает поставленную задачу с меньшей вычислительной сложностью, чем при K -кратном использовании известных алгоритмов одноранговой модификации. Таким образом, предложенный алгоритм представляет собой эффективное средство решения широкого круга задач адаптивной пространственно-временной обработки сигналов в радиотехнических системах различного назначения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Friedlander B. Lattice filters for adaptive processing // Proceedings of the IEEE. — 1982. — Vol. 70, iss. 8. — P. 829–867. <http://dx.doi.org/10.1109/PROC.1982.12407>
2. Cowan C.F.N., Grant P.M. (Eds.) Adaptive filters. — Englewood Cliffs New Jersey: Prentice-Hall, 1985.
3. Sayed A.H. Fundamentals of adaptive filtering. — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003.
4. Lekhovyt'skiy D.I., Milovanov S.B., Rakov I.D., Sverdlov B.G. Universal adaptive lattice filters. Adaptation

for a given root of the estimating correlation matrix // Radiophysics and Quantum Electronics. — 1992. — Vol. 35, No 11–12. — P. 621–636.

5. Likhovitskiy D.I., Abramovich Y.I. Adaptive lattice filters for band-inverse (TVAR) covariance matrix approximations: theory and practical applications // Proc. of the 2009 Int. Radar Symposium. — Hamburg, Germany. — 2009. — P. 535–539.

6. Lev-Ari H., Kailath T. Schur and Levinson algorithms for nonstationary processes // Proc. of the IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing. — 1981. — Atlanta, USA. — Vol. 6. — P. 860–864.

7. Sharman K.C., Durrani T.S. Spatial lattice filter for high-resolution spectral analysis of array data // IEEE Proc. F Communications, Radar and Signal Processing. — 1983. — Vol. 130, no. 3. — P. 279–287.

8. Abramovich Y.I. A controlled method for adaptive optimization of filters using the criterion of maximum SNR // Radio Eng. Electron. Phys.. — 1981. — Vol. 26, no. 3. — P. 87–95.

9. Likhovitskiy D.I. Thirty years experience in development of adaptive lattice filters theory, techniques and testing in Kharkiv // Proc. of the VIII Int. Conf. Antenna Theory and Techniques. — 2011. — Kyiv, Ukraine. — P. 51–56.

10. Efremov V., U Laurukevich, Likhovitskiy D. et al. Results of theoretical and experimental investigations of meteorological formations power spectrum using “superresolution” methods // Proc. of the 2009 Int. Radar Symposium. — Hamburg, Germany. — 2009. — P. 777–784.

Дата поступления рукописи
в редакцию 11.03 2016 г.

Д. І. ЛЕХОВИЦЬКИЙ, В. П. РЯБУХА, Д. С. РАЧКОВ, А. В. СЕМЕНЯКА

Україна, Харківський національний університет радіоелектроніки

E-mail: lekhovitskiydauid@gmail.com

РЕКУРЕНТНІ АЛГОРИТМИ НАЛАШТУВАННЯ АДАПТИВНИХ РЕШІТЧАСТИХ ФІЛЬТРІВ

Проведено аналіз алгоритмів корекції параметрів адаптивних решітчастих фільтрів (АРФ) для K -рангової модифікації оціночної кореляційної матриці в «ковзному» за часом (дальністю) вікні даних при $K \geq 1$. Розглянуто недоліки методів корекції параметрів АРФ, заснованих на K -кратному використанні відомих алгоритмів тимчасової модифікації. Запропоновано комбінований алгоритм K -рангової модифікації, вже одноразове використання якого вирішує задачу корекції параметрів АРФ в зазначених умовах. Показано, що він знижує обчислювальну складність і підвищує чисельну стійкість процедури корекції параметрів АРФ в порівнянні з методами, заснованими на алгоритмах однорангової модифікації.

Ключові слова: просторово-часова обробка сигналів; адаптивний решітчастий фільтр; узагальнена факторизація Левінсона; співмножники Холецкого; окремі коефіцієнти кореляції; комбінований алгоритм.

DOI: 10.15222/TKEA2016.2-3.26

UDC 621.396.965:621.391.26

D. I. LEKHOVYTSKIY, V. P. RIABUKHA,

D. S. RACHKOV, A. V. SEMENIYAKA

Ukraine, Kharkiv National University of Radio Electronics

E-mail: lekhovitskiydauid@gmail.com

RECURSIVE ALGORITHMS OF ADAPTIVE LATTICE FILTERS ADJUSTMENT

The authors analyze the algorithms intended for correction of adaptive lattice filters (ALF) parameters under K -rank ($K \geq 1$) modification of estimate correlation matrix within a “sliding” over the time (range) data window. The drawbacks of methods that correct the ALF parameters based on K -fold utilization of known algorithms of rank-one ($K = 1$) modification are discussed. The combined algorithm (CA) of K -rank ($K \geq 1$) modification is synthesized. Under considered conditions, the only one-fold utilization of the CA solves the task of ALF parameters correction. The paper demonstrates, that proposed CA reduces the computational complexity and enhances the numerical stability of procedure of ALF parameters correction as compared with the competing methods based on algorithms of rank-one modification.

Keywords: space-time signal processing, adaptive lattice filter, Levinson’s generalized factorization, Cholesky multiplier, partial correlation coefficients, combined algorithm.

REFERENCES

1. B. Friedlander Lattice filters for adaptive processing. Proc. of the IEEE, 1982, vol. 70, iss. 8, pp. 829–867. <http://dx.doi.org/10.1109/PROC.1982.12407>

2. C.F.N. Cowan, P.M. Grant (Eds.) Adaptive Filters, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, Inc., 1985, 308 p.

3. A.H. Sayed, Fundamentals of Adaptive Filtering, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2003, 1120 p.

4. D.I. Likhovitskiy, S.B. Milovanov, I.D. Rakov, B.G. Sverdlov. Universal adaptive lattice filters. Adaptation for a given root of the estimating correlation matrix. Radiophysics and Quantum Electronics, 1992, vol. 35, no. 11–12, pp. 621–636.

5. D.I. Likhovitskiy, Y.I. Abramovich. Adaptive lattice filters for band-inverse (TVAR) covariance matrix approximations: theory and practical applications. Proc. of the Int. Radar Symposium 2009, Hamburg, Germany, pp. 535–539.

6. H. Lev-Ari, T. Kailath. Schur and Levinson algorithms for nonstationary processes. Proc. of the IEEE Int. Conf.

Acoustics, Speech and Signal Processing, 1981, Atlanta, USA, vol. 6, pp. 860–864.

7. K.C. Sharman, T.S. Durrani. Spatial lattice filter for high-resolution spectral analysis of array data. IEEE Proc. F Communications, Radar and Signal Processing, 1983, vol. 130, no. 3, pp. 279–287.

8. Y.I. Abramovich. A controlled method for adaptive optimization of filters using the criterion of maximum SNR. Radio Eng. Electron. Phys., 1981, vol. 26, no. 3, pp. 87–95.

9. D.I. Likhovitskiy. Thirty years experience in development of adaptive lattice filters theory, techniques and testing in Kharkiv. Proc. of the VIII Int. Conf. Antenna Theory and Techniques, 2011, Kyiv, Ukraine, pp. 51–56.

10. V. Efremov, U. Laurukevich, D. Likhovitskiy, I. Vylegzhanin, B. Vovshin. Results of theoretical and experimental investigations of meteorological formations power spectrum using “superresolution” methods. Proc. of the Int. Radar Symposium 2009, Hamburg, Germany, pp. 777–784.

К. т. н. А. И. НЕВРЕВ, к. т. н. О. Н. ГАЛЧЁНКОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: a.i.nevrev@gmail.com

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ СИНТЕЗА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СО СВОЙСТВОМ «НЕ БОЛЕЕ ОДНОГО СОВПАДЕНИЯ»

Получено выражение для определения минимально возможной длины последовательностей со свойством «не более одного совпадения». Эта оценка использована для проведения сравнительного анализа эффективности известных регулярных методов построения синтезированных последовательностей. Показана высокая эффективность методов построения, основанных на теории расширенных полей Галуа.

Ключевые слова: последовательность, «не более одного совпадения», регулярные методы построения, нижняя граница длины последовательности, эффективность метода.

Двоичные импульсные сигналы на базе последовательностей или множеств со свойством «не более одного совпадения» (МОС) находят широкое применение в радиолокационных системах при формировании сложных сигналов [1–3], в радионавигационных системах, асинхронных адресных системах связи [4], волоконно-оптических сетях и системах связи [5]. В [2, 3] такие последовательности предложено использовать в системах связи и передачи информации в качестве кодов, обнаруживающих и исправляющих ошибки.

Последовательности со свойством «не более одного совпадения» начинаются и заканчиваются единичным импульсом и состоят из набора импульсов единичной и нулевой амплитуды, размещенных таким образом, что боковые лепестки функции автокорреляции не превышают единицу. Получение сигналов с максимальной энергетикой требует минимально возможной длины последовательности N для заданного веса M , которым называют число единичных импульсов последовательности.

Существует ряд регулярных методов построения МОС, основанных на методах целочисленного программирования, разностных множеств [1], теории полей Галуа [1, 6, 7]. Известные методы построения характеризуются различной вычислительной эффективностью и различными результатами — длиной получаемых последовательностей. Ясно, однако, что чем меньше длина последовательности, тем более эффективным будет ее применение для решения поставленных задач.

В [1, 6–8] предложены регулярные методы синтеза МОС с произвольным весом M над расширенными полями Галуа и приведены постро-

енные последовательности вплоть до $M = 1000$. Что касается численной оценки эффективности разработанных методов, то этот вопрос остается неисследованным.

Целью настоящей работы является оценка эффективности как известных методов синтеза МОС, так и любых вновь разрабатываемых, путем определения теоретически минимально возможной длины последовательности $N_{\min}$ для заданного веса M и сравнения с ней значений реальной длины синтезированных последовательностей.

МОС полностью определяется множеством номеров единичных позиций d_i , $i = 0, \dots, M - 1$. В соответствии с подходом к анализу МОС, предложенному в [4], запишем все последовательные разности единичных позиций в виде треугольной матрицы

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_1 - d_0 & d_2 - d_0 & \dots & d_{M-1} - d_0 \\ 0 & 0 & d_2 - d_1 & \dots & d_{M-1} - d_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & d_{M-1} - d_{M-2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

ненулевые элементы которой определяются через элементы первой наддиагонали:

$$d_{j,l} = d_l - d_j = \sum_{k=0}^{l-j-1} d_{k+1} - d_k = \sum_{k=0}^{l-j-1} d_{k,k-1}; \quad (2)$$

$$j < l; \quad j, l = 0, 1, \dots, M - 1.$$

Длина МОС минимальна, когда ненулевые элементы матрицы D образуют ряд натуральных чисел:

$$d_{j,l} \in [1, 2, \dots, 0,5M(M - 1)]. \quad (3)$$

Если S_u — сумма элементов u -й наддиагонали, то сумма элементов k наддиагоналей равна

$$\sum_{u=1}^k S_u = \frac{1}{2} \left[Mk - \frac{1}{2} k(k+1) \right] \left[1 + Mk - \frac{1}{2} k(k+1) \right]. \quad (4)$$

С учетом условия (3) правая часть выражения (4) представляет собой оценку снизу для суммы элементов k наддиагоналей.

С другой стороны, если учесть, что сумма S_1 первой наддиагонали матрицы (1) равна длине последовательности N , то величину S_u можно выразить через N следующим образом:

$$S_u = uN - \sum_{i=0}^{u-1} (u-i-1)(d_{i,i+1} + d_{M-i-1,M-i}).$$

Очевидно, что сумма элементов u -й наддиагонали максимальна, если наименьшие числа первых $u-1$ наддиагоналей расположены по их краям, то есть выполняется условие

$$d_{i,i+1} + d_{M-i-1,M-i} > 4i - 1, \quad i = 1, \dots, u-1,$$

и тогда

$$\begin{aligned} S_u &\leq uN - \sum_{i=0}^{u-1} (u-i-1)(4i-1) = \\ &= uN + \frac{1}{2} u(u+1) - 2u^2(u-1) + \\ &+ \frac{2}{3} (u^3 - 3u^2 + u). \end{aligned}$$

В этом случае оценка сверху для суммы элементов k наддиагоналей матрицы D принимает вид

$$\begin{aligned} \sum_{u=1}^k S_u &\leq \frac{1}{2} k(k+1)N - \frac{2}{3} k(k-1)(k+1) - \\ &- \frac{1}{6} k(k-1)(k+1)(k-2). \end{aligned} \quad (5)$$

Из сопоставления верхней оценки (5) с нижней (4) получаем оценку снизу длины МОС:

$$\begin{aligned} N_n &\geq \left\{ \left(\frac{M}{k+1} - \frac{1}{2} \right) \left[1 + Mk - \frac{1}{2} k(k+1) \right] + \right. \\ &\left. + \frac{1}{3} (k+1)(k-1) + 1 \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

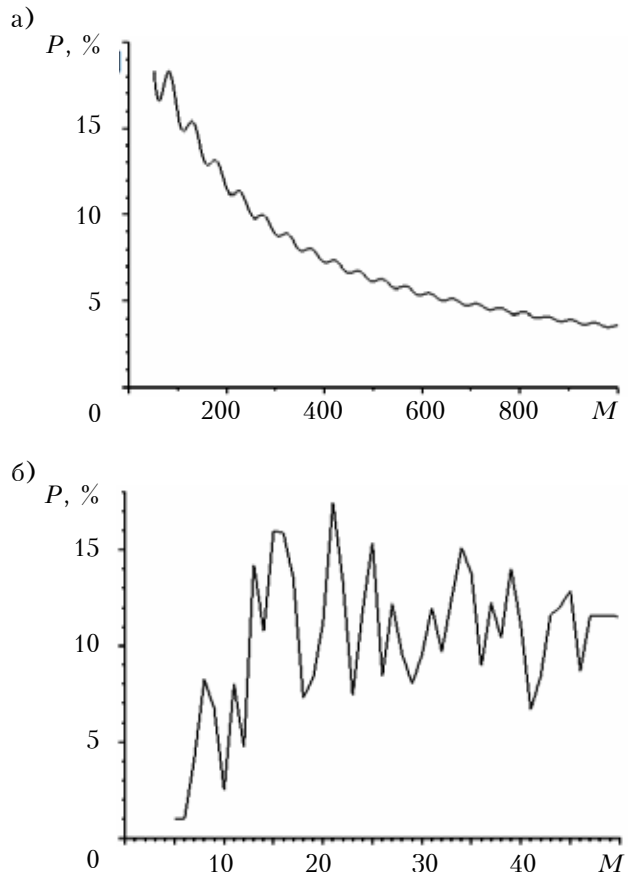
Правая часть неравенства (6) зависит от переменной k , определенной на отрезке $[1, M-1]$, от которой можно избавиться при поиске экстремума правой части выражения (6). Окончательно нижнюю оценку длины МОС запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} N_{\min} &= \max \left\{ \left(\frac{M}{k+1} - \frac{1}{2} \right) \left[1 + Mk - \frac{1}{2} k(k+1) \right] + \right. \\ &\left. + \frac{1}{3} (k+1)(k-1) + 1 \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где максимум ищется по всем значениям $k \in [M-1]$.

Полученное выражение позволяет количественно оценить эффективность известных методов построения МОС, определяя величину P — превышение длины рассматриваемой последовательности над минимально возможной.

В [1, 6] разработан метод построения на базе расширенных полей Галуа и просчитаны МОС для диапазона $M = 5-50$. В более поздних работах [7, 8] использован похожий подход и получены МОС с величиной M вплоть до 1000, причем результаты синтеза для диапазона $M = 5-50$ практически совпали с известными результатами, полученными в [1, 6]. Полученные в результате синтеза последовательности с весом 1000 приведены в [8]. Таким образом, в указанных работах для большого диапазона M (от 5 до 1000) предложены регулярные методы построения и построены МОС, имеющие конкретную длину. На основании этих данных проведен анализ эффективности рассмотренных методов, численные результаты которого приведены на рисунке.



Результаты сравнения длины последовательностей, полученных в [1, 6] (а) и в [7, 8] (б), с минимально возможной длиной МОС, рассчитанной в соответствии с выражением (7)

M	5–10	10–20	20–30	30–40	40–50	50–70	70–100
P^* , %	4,3	10,7	11	11,7	11	17,6	17,7
M	100–150	150–200	200–300	300–400	400–600	600–1000	
P^* , %	17,5	12,7	10,3	8	7	4,5	

Для интегральной оценки эффективности регулярных методов построения МОС на базе расширенных полей Галуа [1, 6–8] было проведено поинтервальное сравнение значений длины полученных в этих работах последовательностей с оценкой (7). При этом ряд значений $M = 5–1000$ разбивался на поддиапазоны, для каждого из которых было просчитано значение P^* – средний процент превышения длины синтезированных последовательностей над оценкой (7). Результаты сравнения приведены в **таблице**.

Приведенные на графиках и в таблице данные свидетельствуют о высокой эффективности регулярных методов построения [1, 6–8], видимо, асимптотически стремящейся к предельной при неограниченном увеличении M (для $M = 3000$ значение P составляет менее 3%).

Таким образом, полученное выражение для расчета минимальной предельной длины МОС позволяет проводить количественную оценку эффективности регулярных методов построения последовательностей со свойством «не более одного совпадения».

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Свердлик М.Б. Оптимальные дискретные сигналы. – Москва: Советское радио, 1975.

2. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. – Москва: Техносфера, 2007. – 488 с.

3. Складар Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – Москва: Издательский дом «Вильямс», 2003.

4. Глобус И. А. Двоичное кодирование в асинхронных системах. – Москва: Связь, 1972. – 108 с.

5. Складаров О.В. Волоконно-оптические сети и системы связи. – Москва: СОЛОН-Пресс, 2004.

6. Свердлик М.Б., Мелешкевич А.Н. Синтез оптимальных множеств со свойством «не более одного совпадения» // Радиотехника и электроника. – 1976. – Т. 19, № 7. – С. 1443–1451.

7. Гантмахер В.Е., Платонов С.М. Синтез оптимальных импульсных последовательностей со свойством «не более одного совпадения» над расширенными полями Галуа второй и третьей степени. // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2009. – № 6. – С. 31–36.

8. База данных оптимальных импульсных последовательностей со свойством «не более одного совпадения»: Свид. о гос. регистрации № 2009620525 / Новгородский гос. ун-т имени Ярослава Мудрого / Платонов С.М., Гантмахер В.Е. – 11.01.2010.

Дата поступления рукописи
в редакцию 18.02 2016 г.

О. І. НЕВРЕВ, О. М. ГАЛЧОНКОВ

Україна, Одеський національний політехнічний університет
e-mail: a.i.nevrev@gmail.com

ЕФЕКТИВНІСТЬ МЕТОДІВ СИНТЕЗУ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ З ВЛАСТИВІСТЮ «НЕ БІЛЬШЕ ОДНОГО ЗБІГУ»

Отримано вираз для визначення мінімально можливої довжини послідовностей з властивістю «не більше одного збігу». Цю оцінку використано для проведення порівняльного аналізу ефективності відомих регулярних методів побудови синтезованих послідовностей. Показано високу ефективність методів побудови, заснованих на теорії розширених полів Галуа.

Ключові слова: послідовність, «не більше одного збігу», регулярні методи побудови, нижня межа довжини послідовності, ефективність методу.

DOI: 10.15222/TKEA2016.2-3.33
UDC 612.391.15

A. I. NEVREV, O. N. GALCHENKOV

Ukraine, Odessa National Polytechnic University
e-mail: a.i.nevrev@gmail.com

EFFICIENCY OF SEQUENCE SYNTHESIS METHODS WITH THE «NOT MORE THAN ONE COINCIDENCE» PROPERTY

The author presents an expression for determining the minimum possible length of binary sequences with «not more than one coincidence» property. Obtained low bound length value allows quantitatively estimating

efficiency of any known synthesis methods for creation of binary sequences with «not more than one coincidence» property. The efficiency of known methods of creating binary sequences based on extended Galois fields theory is analyzed by comparing the obtained sequences length with a theoretical low bound estimation. The paper shows high performance of the known methods of creation of sequences with «not more than one coincidence» property based on extended Galois fields.

Keywords: binary sequences, sequences with «not more than one coincidence», lower bound sequence length estimate, Galois fields.

REFERENCES

1. Sverdlik M.B. *Optimal'nye diskretnye signaly* [Optimal discrete signals]. Moscow, Sovetskoe Radio, 1975, 200 p.
2. Ipatov V.P. *Shirokopolosnye sistemy i kodovoe razdelenie signalov. Printsipy i prilozheniya* [Wideband Systems and Code Signal Separation. Principles and Applications]. Moscow, Technosfera, 2007, 488 p.
3. Sclar Bernard. *Digital communication. Fundamentals and Application*. Prentice Hall RTP, 2001.
4. Globus I. A. *Dvoichnoe kodirovanie v asinkhronnykh sistemakh* [Binary coding in asynchronous systems]. Moscow, Svyaz', 1972, 108 p.
5. Sklyarov O.V. *Volokonno-opticheskie seti i sistemy svyazi* [Fiber optic networks and communication systems]. Moscow, SOLON-Press, 2004, 272 p.
6. Sverdlik M.B., Meleshkevich A.N. [Synthesis of optimal sequences with property "not more than one coincidence"]. *Radiotekhnika i elektronika*, 1976, vol. 19, no. 7, pp. 1441-1451.
7. Gantmakher V.E., Platonov S.M. [Optimal pulse sequences with property "Not more than one coincidence" synthesis over extended Galois fields to the second and third power] *Proceedings of the Russian Universities. Radioelektronika*, 2009, no. 6, pp. 31-36. (Rus)
8. [Data base for optimal pulse sequences with property "not more than one coincidence"]: Certificate database state registration number 2009620525 / Yaroslav-the-Wise Novgorod State University / Platonov S.M., Gantmakher V.E., 11.01.2010.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Теслюк В. М., Пукач А. І., Загарю Р. В. Методи, моделі та засоби автоматизації визначення ємнісних і резистивних параметрів елементів МЕМС.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Проаналізовано методи, моделі та засоби визначення електричного опору резистивних параметрів електричних кіл, а також розглянуто резистивні та ємнісні параметри МЕМС та особливості автоматизації визначення їх значення. Наведено розроблені методи для автоматичного визначення електричного опору та ємності резистивних та ємнісних параметрів МЕМС, що враховують особливості та специфіку МЕМС-технологій. Здійснено моделювання роботи розроблених методів та аналіз отриманих результатів.

Для радіоінженерів, науковців і студентів, які спеціалізуються у сфері автоматизації вимірювання та контролю ємнісних і резистивних параметрів мікроелектронних пристроїв та систем.



НОВЫЕ КНИГИ

Бобало Ю. Я., Стахів П. Г., Рендзіняк С. Й. та ін. Комбінований (гібридний) лабораторний практикум з теорії електричних та електронних кіл, сигналів і вимірювань у комп'ютеризованій лабораторії.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016.

Навчальний посібник містить комплекс лабораторних робіт з теорії електричних та електронних кіл, сигналів і вимірювань, які виконують у два етапи: фізичний експеримент та віртуальний експеримент. Такий підхід дає змогу поглибити здобуті теоретичні знання, набути практичних навичок роботи з технічним обладнанням.

Для студентів електротехнічних та електромеханічних спеціальностей вищих навчальних закладів.



Д. ф.-м. н. В. П. МАХНИЙ, к. ф.-м. н. О. В. КИНЗЕРСКАЯ, И. М. СЕНКО,
к. ф.-м. н. А. М. СЛЁТОВ

Украина, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

E-mail: oksanakinzerska@gmail.com, o.slyotov@chnu.edu.ua

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРИСТАЛЛОВ ZnSe:Yb

Исследовано влияние иттербия на люминесцентные свойства беспримесных кристаллов селенида цинка. Показано, что в спектрах излучения образцов ZnSe:Yb наблюдается только голубая полоса, имеющая экситонную природу и обладающая высокой температурной стабильностью.

Ключевые слова: селенид цинка, редкоземельные элементы, люминесценция, голубая полоса, экситон.

Селенид цинка продолжает оставаться одним из наиболее перспективных полупроводников для создания на его основе сине-голубых источников спонтанного [1] и вынужденного излучений [2, 3], что вызывает необходимость получения этого материала с преимущественной краевой люминесценцией. К сожалению, она является малоэффективной и, как правило, сопровождается более длинноволновым излучением в кристаллах как стехиометрического состава, так и легированных различными примесями в процессе роста [4, 5]. В связи с этим, для подавления низкоэнергетических полос применяют дополнительные операции, которые обычно заключаются в проведении высокотемпературных отжигов в расплаве или в парах собственных компонент либо других элементов. В частности, к настоящему времени путем легирования беспримесных кристаллов ZnSe из паровой фазы элементами I группы (Li, K, Na) [6], оловом [7], магнием [8] и селеном [9] уже получены образцы с единственной эффективной голубой полосой люминесценции при 300 К. Недавно [10] аналогичный результат был получен при диффузии редкоземельных элементов, которые согласно [11, 12] должны также способствовать повышению термической и радиационной стойкости параметров материала. Настоящая работа посвящена изучению поведения голубой полосы излучения кристаллов ZnSe:Yb при высоких температурах.

Образцы и методы исследований

В качестве базовых образцов были выбраны наиболее часто используемые объемные кристаллы селенида цинка, выращенные из расплава стехиометрического состава под давлением инертного газа [4, 5]. Вырезанные из кристалла подложки размером 5×5×1 мм проходили механическую и химическую полировку в травителе состава $\text{CrO}_3:\text{HCl} = 2:3$, в результате чего

их поверхность становилась зеркальной, и в образцах наблюдалась объемная люминесценция.

Легирование подложек иттербием осуществлялось в откачанной до 10^{-4} Торр и запаянной кварцевой ампуле, в противоположных концах которой находились образец и измельченные Yb и Se (последний способствует преимущественному вхождению примеси Yb в катионную (цинковую) подрешетку соединения, а также обеспечивает противодействие, благодаря чему поверхность подложек остается зеркальной). Температура отжига T_a составляла 1400 К, а время процесса t_a определялось желаемой толщиной d диффузионного слоя и рассчитывалось по формуле $t_a = d^2/D$. Поскольку диффузия происходит со всех сторон образца, значение d задавалось равным половине толщины подложки ($d \approx 0,5$ мм). Экспериментальное значение коэффициента диффузии D при температуре 1400 К составило $5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$. В результате было получено значение $t_a \approx 2,5$ ч.

Люминесценция возбуждалась N_2 -лазером с длиной волны $\lambda_m \approx 0,337$ мкм, а спектры излучения N_ω измерялись на универсальной установке, которая допускала обычный и дифференциальный режим работы [13]. Комплекс содержал дифракционный монохроматор МДР-23 и стандартную схему синхродетектирования с автоматической записью спектральных характеристик. Изменение уровня возбуждения L в пределах трех порядков осуществлялось посредством набора калиброванных нейтральных светофильтров. Исследование люминесцентных свойств образцов проводилось в температурном диапазоне 300–470 К.

Обсуждение результатов исследований

В спектрах фотолюминесценции базовых подложек при 300 К наблюдаются две полосы — красная (R) и голубая (B), соотношение между интенсивностями которых зависит от уровня возбуждения L . Первая из них обусловлена ре-

комбинацией с участием донорно-акцепторных пар (ДАП), в состав которых входят двухзарядные отрицательные вакансии цинка V_{Zn}'' и однозарядные положительные вакансии селена $V_{Se}^\bullet$ [13]. Краевая B -полоса является результатом излучательной рекомбинации свободных электронов с дырками, а также свободных дырок с электронами, локализованными на мелких донорных центрах $V_{Se}^\bullet$ с глубиной залегания около 0,02 эВ [13].

Главным отличием легированных образцов от базовых является отсутствие в спектрах излучения R -полосы, что обусловлено «залечиванием» атомами иттербия вакансий цинка V_{Zn}'' , которые входят в состав ДАП. Претерпевает определенные изменения и крайняя полоса люминесценции (рис. 1), которая в исследуемом температурном диапазоне обладает следующими свойствами.

В первую очередь отметим, что максимум излучения $\hbar\omega_m$ находится ближе к ширине запрещенной зоны E_g , а разница $E_g - \hbar\omega_m$ меньше 0,2 эВ, что наблюдается для базовых подложек. Во-вторых, положение максимума зависит от уровня возбуждения, смещаясь в сторону меньших энергий с ростом L . В-третьих, зависимость интенсивности излучения I краевой полосы от L носит степенной характер: $I \sim L^{1.5}$. И наконец, рост уровня возбуждения вызывает поднятие низкоэнергетического «крыла» B -полосы.

Все перечисленные особенности характерны для аннигиляции экситонов при их неупругом рассеянии на свободных носителях заряда [14]. Таким образом, крайняя полоса люминесценции в образцах ZnSe:Yb имеет экситонную природу вплоть до 470 К, что стимулировано примесью иттербия. Вместе с тем, окончательное установление природы экситона выходит за рамки дан-

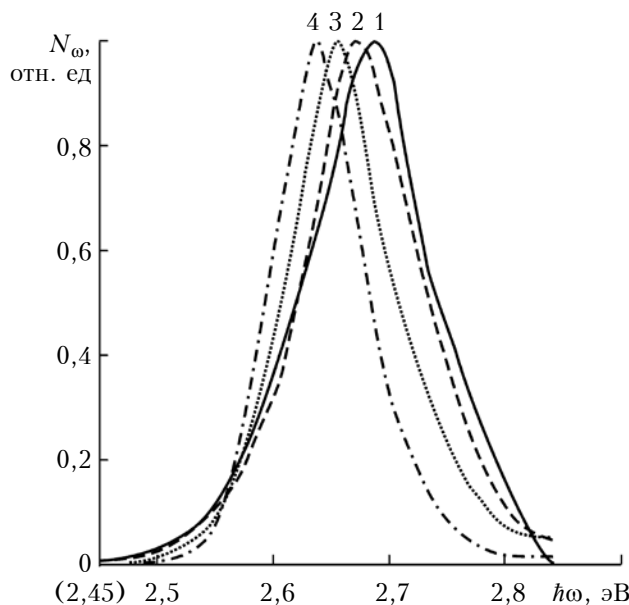


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции кристаллов ZnSe:Yb при разных температурах:
1 — 295 К; 2 — 350 К; 3 — 410 К; 4 — 470 К

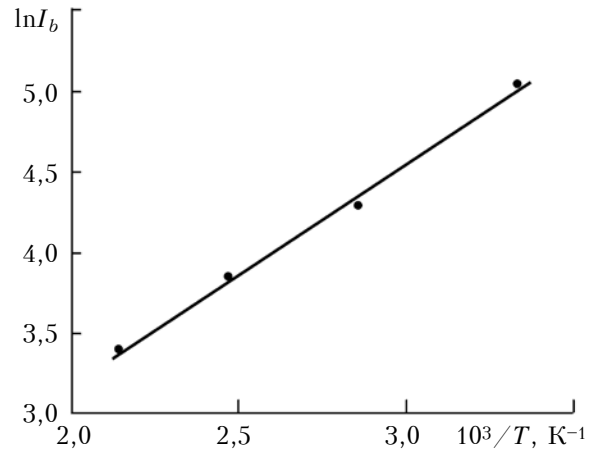


Рис. 2. Температурная зависимость интенсивности B -полосы кристаллов ZnSe:Yb

ной работы и требует дополнительных исследований, особенно при низких температурах.

Также для краевой люминесценции кристаллов ZnSe:Yb характерны высокие эффективность (около 30% при 300 К) и температурная стабильность. Так, интенсивность I_b голубой полосы в температурном диапазоне 300–470 К в первом приближении описывается выражением $I_b \sim \exp(-E_a/(kT))$ с $E_a = 0,11$ эВ (рис. 2). При этом отношение $I_b(300)/I_b(470)$ не превышает 2, что согласуется с данными, полученными для кристаллов ZnSe, легированных изovalентной примесью Mg [15]. Обратим внимание на то, что для базовых подложек это отношение почти на порядок больше.

Таким образом, несмотря на различную природу примесей (Yb — редкоземельный элемент, а Mg — изovalентная примесь), обе они вызывают существенное увеличение температурной стабильности селенида цинка. Эти факты в совокупности с экситонным характером B -полосы представляют практический интерес с точки зрения получения в таких кристаллах высокотемпературного лазерного излучения в голубой области спектра при электронном возбуждении. Кроме того, $m-i-n$ -структуры на базе низкоомных подложек n -ZnSe с диффузионным слоем i -ZnSe:Yb могут служить основой голубых светодиодов при успешном решении проблемы создания эффективного инжектирующего контакта.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Георгобиани А. Н., Котляревский М. Б. Проблемы создания инжекционных светодиодов на основе широкозонных полупроводниковых соединений $A^{IV}B^{VI}$ // Изв. АН СССР. Сер. физическая. — 1985. — Т. 49, № 10. — С. 1916–1922.
2. Богданкевич О. В. Полупроводниковые лазеры с накачкой электронным пучком // Квантовая электроника. — 1994. — Т. 21, № 12. — С. 1113–1136.
3. Бережной К. В., Насибов А. С., Шапкин П. В. и др. Излучение пластин селенида цинка при возбуждении импульсным электрическим полем // Квантовая электроника. — 2008. — Т. 38, № 9. — С. 829–832.

4. Морозова Н. К., Кузнецов В. А., Рыжиков В. Д. Селенид цинка. Получение и оптические свойства. — Москва: Наука, 1992.

5. Недеогло Д. Д., Симашкевич А. В. Электрические и люминесцентные свойства селенида цинка. — Кишинев: Штиинца, 1984.

6. Березовский М. М., Махний В. П., Мельник В. В. Влияние примесей Li, Cd, In и As на оптоэлектронные свойства ZnSe // Неорганические материалы. — 1997. — Т. 33, № 2. — С. 181–183.

7. Гривул В.И., Махний В.П., Слетов М.М. Природа краевой люминесценции диффузионных слоев ZnSe:Sn // ФТП. — 2007. — Т. 41, № 7. — С. 806–807.

8. Слетов М. М. Краевая люминесценция селенида цинка, легированного изовалентной примесью магния // Письма в ЖТФ. — 2001. — Т. 27, № 2. — С. 48–50.

9. Краснов А. Н., Ваксман Ю. Ф., Пуртов Ю. Н. Дырочная проводимость в монокристаллах с избытком металлоида // Письма в ЖТФ. — 1992. — Т. 18, № 12. — С. 1–5.

10. Махний В. П., Кінзерська О. В., Сенко І. М., Ащеулов А. А. Люмінесцентні властивості кристалів ZnSe:Yb з модифікованою поверхнею // Науковий вісник ЧНУ. Фізика. Електроніка. — 2014. — Т. 3, вип. 1. — С. 112–114.

11. Гореленок А. Т., Каманин А. В., Шмидт Н. М. Редкоземельные элементы в технологии соединений Al_{III}V и приборов на их основе // ФТП. — 2003. — Т. 37, № 8. — С. 922–940.

12. Глазов В. М., Потемкин А. Я., Тимошина Г. Г., Михайлова М. С. О возможности повышения термостабильности Si путем его легирования переходными либо редкоземельными металлами // ФТП. — 1997. — Т. 31, № 9. — С. 1025–1028.

13. Ткаченко І. В. Механізми дефектоутворення та люмінесценції у бездомішкових і легованих телуrom кристалах селеніду цинку // Дис. ... канд. фіз.-мат. наук. — ЧНУ ім. Юрія Федьковича. — 2005.

14. Koh Era, Langer D. W. Luminescence of ZnSe near the band edge under strong laser light excitation // J. Luminescence. — 1970. — Vol. 1-2. — P. 514–527.

15. Махний В. П., Слєтов М. М., Чабан Ю. Я. Дырочная проводимость в кристаллах селенида цинка легированных элементами V группы из паровой фазы // Письма в ЖТФ. — 2000. — Т. 26, № 1. — С. 13–16.

Дата поступления рукописи
в редакцию 18.05 2016 г.

В. П. МАХНИЙ, О. В. КІНЗЕРСЬКА, І. М. СЕНКО, О. М. СЛЮТОВ

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

E-mail: oksanakinzerska@gmail.com o.slyotov@chnu.edu.ua

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ КРИСТАЛІВ ZnSe:Yb

Досліджено вплив ітербію на люмінесцентні властивості бездомішкових кристалів селеніду цинку. Показано, що в спектрах випромінювання зразків ZnSe:Yb спостерігається тільки блакитна смуга, яка має екситонну природу та високу температурну стабільність.

Ключові слова: селенід цинку, рідкоземельні елементи, люмінесценція, блакитна смуга, екситон.

DOI: 10.15222/TKEA2016.2-3.37

UDC 625.315.592; 535.37

V. P. MAKHNIY, O. V. KINZERSKA,

I. M. SENKO, O. M. SLYOTOV

Ukraine, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

E-mail: oksanakinzerska@gmail.com o.slyotov@chnu.edu.ua

HIGH TEMPERATURE LUMINESCENCE OF ZNSE:YB CRYSTALS

The problem of obtaining of effective edge luminescence with high temperature stability in the zinc selenide crystals is discussed. This task is solved by using as the dopant rare-earth element yttrium, which is introduced into the undoped ZnSe crystal by diffusion method. Doping was carried out in an evacuated to 10⁻⁴ Torr. and a sealed quartz ampoule, in the opposite ends of which is a sample and a mixture of the crushed Yb and Se. It has been found that the diffusion coefficient of yttrium at a temperature of 1400 K is about 5·10⁻⁷ cm²/sec. It is shown that in the luminescence spectra of ZnSe:Yb samples in the temperature range 295–470 K only blue band is observed. Dependencies of parameters of this band from the excitation level are typical for the annihilation of excitons at their inelastic scattering by free carriers. The efficacy of blue radiation at 300 K is about 30% and does not fall more than twice with increasing temperature up to 470 K, indicating its high thermal stability.

Keywords: zinc selenide, rare-earth elements, luminescence, blue band, exciton.

REFERENCES

1. Georgobiani A.N., Kotlyarevsky M.B. Problems of creation of injection LEDs based on wide bandgap semiconductor compounds. *Izvestiia AN SSSR. Ser. Fizika*, 1985, vol. 49, no 10, pp. 1916-1922. (Rus)

2. Bogdankevich O.V. Semiconductor lasers pumped by an electron beam O. V. Bogdankevich. *Electron-beam-pumped semiconductor lasers. Kvant. electron.*, 1994, vol. 21, no. 12, pp. 1113–1136 (Mi qe257) (Rus)

3. Berezhnoi K.V., Nasibov A.S., Shapkin P.V., Shpak V.G., Shunaylov S.A., Yalandin M.I. Emission of zinc

selenide plates excited by a pulsed electric field. *Quantum Electronics*, 2008, vol. 38, no. 9, pp. 829-832. <http://dx.doi.org/doi:10.1070/QE2008v038n09ABEH013814>

4. Morozova N.K., Kuznetsov V.A., Ryzhykov V.D. *Selenid tsinka. Poluchenie i opticheskie svoystva* [Zinc selenide. Obtaining and optical properties]. Moscow, Nauka, 1992, 94 p. (Rus)

5. Nedeoglo D.D., Simashkevich A.V. *Elektricheskie i lyuminestsentnye svoystva selenida tsinka* [Electrical and luminescent properties of zinc selenide]. Chisinau, Shtiintsa, 1984, 150 p. (Rus)

6. Berezovsky M.M., Makhny V.P., Melnyk V.V. [The influence of Li, Cd, In and As impurities on the optoelectronic properties of ZnSe]. *Neorganicheskie materialy*, 1997, vol. 33, no. 2, pp. 181-183. (Rus)

7. Gryvul V.I., Makhniy V.P., Slyotov M.M. The origin of edge luminescence in diffusion ZnSe:Sn layers. *Semiconductors*, 2007, vol. 41, iss. 7, pp. 784-785. <http://dx.doi.org/doi:10.1134/S1063782607070020>

8. Sletov M.M. Edge luminescence from zinc selenide doped with isovalent magnesium impurity. *Technical Physics Letters*, 2001, vol. 27, iss. 1, pp. 63-64. <http://dx.doi.org/doi:10.1134/1.1345168>

9. Krasnov A.N., Vaksman Yu.F., Purtov Yu.N. The hole conductivity of single crystals with an excess of metalloid *Pis'ma v ZhTF*, 1992, vol. 18, no. 12, pp. 1-5. (Rus)

10. Makhniy V.P., Kinzerska O.V., Senko I.M., Asheulov A.A. [Luminescent properties of ZnSe: Yb crystals with modified surface]. *Naukovyi visnyk ChNU. Fizyka. Elektronika*, 2014, vol. 3, iss. 1, pp. 112-114. (Ukr)

11. Gorelenok A. T., Kamanin A. V., Shmidt N. M. Rare-earth elements in the technology of III-V compounds and devices based on these compounds, *Semiconductors*. 2003, vol. 37, iss. 8, pp. 894-914. <http://dx.doi.org/doi:10.1134/1.1601656>

12. Glazov V. M., Timoshina G. G., Mikhailova M. S., Potemkin A. Ya. Possibility of increasing the thermal stability of Si by doping with transition or rare-earth metals, *Semiconductors*. 1997, vol. 31, iss. 9, pp. 875-878. <http://dx.doi.org/doi:10.1134/1.1187158>

13. Tkachenko I.V. [Mechanisms of defect formation and luminescence in the intrinsic and Te-doped crystals of zinc selenide]. *Diss. kand. fiz.-mat. nauk*, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2005. (Ukr)

14. Koh Era, Langer D. W. Luminescence of ZnSe near the band edge under strong laser light excitation. *J. Luminescence*, 1970, vol. 1-2, pp. 514-527.

15. Makhniy V. P., Slyotov M. M., Chaban Yu. Ya. Hole conduction in zinc selenide crystals doped with elements of group V from the vapor phase. *Technical Physics Letters*, 2001, Vol. 26, iss. 1, pp. 6-7. <http://dx.doi.org/doi:10.1134/1.1262720>

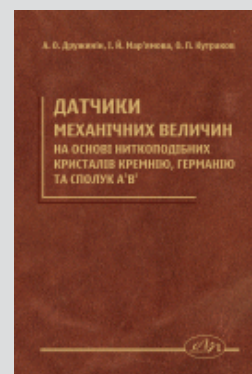
НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П. Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук АЗВ⁵.— 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 АЗВ⁵ 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 багатофункційних датчиків для вимірювання механічних і теплових величин.

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



М. В. ЯРМОЛИЧ^{1, 3}, к. ф.-м. н. Н. А. КАЛАНДА¹, д. ф.-м. н. С. Е. ДЕМЬЯНОВ¹,
к. ф.-м. н. М. В. СИЛИБИН³, к. т. н. Г. Г. ГОРОХ^{2, 4}

Беларусь, г. Минск, ¹НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, ²БГУИР;

Россия, г. Москва, ³НИИ «МИЭТ», г. Санкт-Петербург, ⁴Университет ИТМО

E-mail: jarmolich@physics.by, kalanda@physics.by, demyanov@physics.by, pcfme@mee.ru, gorokh@bsuir.by

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОПОРОШКОВ ФЕРРОМОЛИБДАТА СТРОНЦИЯ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ СВЕРХСТРУКТУРНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ ДЛЯ СПИНТРОНИКИ

Наноразмерная магнитная керамика со структурой двойного перовскита на основе соединений ферромолибдата стронция (ФМС) $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ синтезирована цитрат-гель-методом из консистентных растворов с различным значением pH. Установлена корреляционная зависимость скорости и степени фазовых превращений ФМС в результате высокотемпературного отжига. Показано, что на магнитное состояние керамики влияет микроструктура порошка ФМС и степень сверхструктурного упорядочения катионов Fe^{3+} , Mo^{5+} , которая существенным образом зависит от величины pH исходных растворов. Установлено, что при pH = 4 образуются наночастицы с большей микроструктурной и магнитной однородностью, а также меньшей магнитной анизотропией. Определены оптимальные условия синтеза нанопорошков ФМС, позволяющие осуществлять направленное изменение фазового состава синтезируемой наноразмерной керамики с воспроизводимыми физико-химическими свойствами.

Ключевые слова: ферромолибдат стронция, цитрат-гель-метод, сверхструктурное упорядочение катионов, намагниченность, суперпарамагнитное состояние.

Большой научный интерес к разработке методов получения двойных перовскитов состава $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ и к исследованию их магнитных и электрофизических свойств обусловлен перспективой их применения в микроэлектронике и спинтронике. Возможность реализации в таких системах туннельного барьера [1, 2], наличие вероятности возникновения туннельного магнитного резонанса, гигантского магниторезистивного эффекта наделяют такие объекты уникальными и чрезвычайно важными для практического применения свойствами, в частности туннельным магнетосопротивлением, достигающим при комнатной температуре 60–120% [3, 4]. Вместе с тем электрофизические свойства и магнитные характеристики пленок таких материалов во многом зависят от микроструктуры, размеров и состава частиц, составляющих их, то есть от физических параметров, которые в свою очередь определяются методами и технологическими режимами синтеза самих пленок [5–7].

В двойных перовскитах при образовании точечных дефектов катионы железа могут одновременно находиться в различных спиновых состояниях: низкоспиновом, промежуточном и высокоспиновом [8, 9], и тогда спиновым состоянием катионов Fe и Mo можно управлять путем введения антиструктурных и других точеч-

ных дефектов. При этом наличие нульмерных дефектов в структуре $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ определяется прежде всего условиями синтеза и микроструктурой образцов. Так, в [10–13] показано, что при повышении температуры синтеза образцов $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ наблюдается увеличение ферромагнитного упорядочения спинов электронов из-за роста зерен и уменьшения межзеренных границ, на которых происходит их разупорядочение, что способствует повышению температуры Кюри и намагниченности материала. Однако наряду с улучшением магнитных свойств соединения результаты измерений магнитной восприимчивости при переменном токе, а также температурных зависимостей намагниченности образцов, предварительно охлажденных от комнатной температуры до 4,2 К и затем нагретых в магнитном поле, указывают на наличие в ферромагнитной матрице антиферромагнитных включений и магнитного спинового стекла. Присутствие антиферромагнитных кластеров со средним радиусом 20–30 нм подтверждалось также методом малоуглового рассеяния на нейтронах SANS [14].

Для того чтобы контролируемо управлять спиновым состоянием катионов железа, молибдена и, соответственно, физико-химическими свойствами $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, необходимо изучить магнитный беспорядок материала на нано- и микроуровне. Такие исследования могут помочь в решении проблем, возникающих при разработке магнитоуправляемых устройств для электронной техники, обусловленных прежде всего по-

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ (проект № 16-38-50018 мол_нр).

исками надежных методов синтеза. Это позволит воспроизводимым образом получать двойные перовскиты с требуемыми для микроэлектронной промышленности физико-химическими свойствами.

Ранее нами были синтезированы наноразмерные порошки соединения $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ цитрат-гель-методом [15]. В результате рентгенофазового анализа установлено, что степень сверхструктурного упорядочения катионов Fe^{3+} и Mo^{5+} зависит от условий получения образцов. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии определено химическое состояние катионов железа и молибдена в порошках, в результате анализа энергетических спектров получены численные значения энергий связи основных электронных уровней ($\text{Fe}2p$ и $\text{Mo}3d$) и процентное соотношение валентных состояний катионов железа и молибдена в соединении. На основании анализа температурных зависимостей намагниченности выдвинуто предположение о реализации в наноразмерных зернах ферромолибдата стронция метастабильного суперпарамагнитного состояния при температуре ниже 19 К.

В настоящей работе продолжены комплексные исследования наноразмерной магнитной керамики со структурой двойного перовскита на основе соединения $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, в процессе которых устанавливалась взаимосвязь условий получения, микроструктуры и магнитных характеристик образцов для эффективного выбора методов получения материалов, перспективных для устройств спинтроники и магнитоэлектроники.

Образцы и методы исследований

Наноразмерные порошки соединения $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ получали цитрат-гель-методом из концентрированного раствора, состоящего из смеси веществ $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ [15]. Растворы с различным значением pH (2, 4, 6, 9), полученные добавлением соответствующего количества этилендиамина в исходный раствор, выпаривали до консистенции масла и затем подвергали многостадийной термической обработке. Сначала проводили отжиг при температуре 373 К, затем нагревали со скоростью 0,4 К/мин до 473 К и выдерживали в течение 18 ч. Образовавшийся осадок в виде пены после мелкого помола отжигали сначала при 773 К в атмосфере кислорода при давлении $0,21 \cdot 10^5$ Па в течение 10 ч, а затем в восстановительной среде, состоящей из смеси газов 5% H_2/Ar , при 1223 К в течение 4 ч.

Серии отжигаемых порошков были обозначены в зависимости от значения pH исходных растворов: SFMO-2 (pH=2), SFMO-4 (pH=4), SFMO-6 (pH=6) и SFMO-9 (pH=9).

Поскольку после термического отжига синтезированные порошки представляли собой агломерированные частицы, они были подвергнуты процедуре диспергирования с помощью ультразвукового гомогенизатора Bandelin HD 2200 в

непрерывном режиме с номинальной мощностью 55%. Для диспергирования готовились взвеси из $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ в растворе этилового спирта с различной концентрацией. После этого на установке лазерной диагностики Zetasizer Nano ZS90 фирмы Malvern (Великобритания) проводились измерения размеров частиц порошков.

Рентгенофазовый анализ выполняли при комнатной температуре на установке ДРОН-3 ($\text{CuK}\alpha$ -излучение) со скоростью съемки $60^\circ/\text{ч}$. Долю α образующегося в порошке ферромолибдата стронция (ФМС), а также других фаз, оценивали на основании данных рентгенофазового анализа с использованием программы PowderCell. Анализ микроструктуры и элементного состава проводился с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-700F. Для измерения размеров наночастиц использован метод динамического рассеяния света (ДРС).

Магнитные свойства порошков исследовали с помощью универсальной установки фирмы Cryogenic Limited (Великобритания) в диапазоне 4,2–300 К в постоянном магнитном поле с индукцией B до 8 Тл. Для исследования температурных зависимостей удельной намагниченности порошки предварительно охлаждали до 4,2 К и затем проводили нагрев в присутствии магнитного поля.

Результаты исследований и их обсуждение

На основании результатов рентгенофазового анализа было установлено, что полученные после отжига при 773 К порошки являются многофазными и содержат соединения SrMoO_4 , SrCO_3 и Fe_3O_4 (их процентное содержание можно увидеть на рис. 1). При нагреве порошков со скоростью 2 К/мин от 773 до 1273 К происходили фазовые превращения, приводящие к образованию твердого раствора ФМС. При этом, как видно из рис. 1, а, порошок SFMO-2 не получился однофазным (с ростом температуры увеличивалось процентное содержание не только двойного перовскита, но и сопутствующей фазы Sr_3MoO_6), в связи с чем температурные зависимости степени превращения фаз в нем не рассматривались.

Характер рентгеновских рефлексов (их уширение и смещение) указывает на то, что для всех исследованных порошков на начальном этапе взаимодействия образующийся ФМС обогащен железом, и его химическая формула имеет вид $\text{Sr}_2\text{Fe}_{1+x}\text{Mo}_{1-x}\text{O}_{6-\delta}$, где $0 < x < 1$. Состав ФМС в ходе протекания химических процессов при постепенном увеличении температуры меняется в сторону увеличения содержания молибдена, что приводит к изменению параметров его кристаллической решетки. Молибден несколько быстрее, чем железо, вступает в реакцию с карбонатом стронция. При температуре 1223 К наблюдаются рентгеновские рефлексы практически только соединения $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$.

Установлено, что использованный метод позволил синтезировать ФМС со сверхструк-

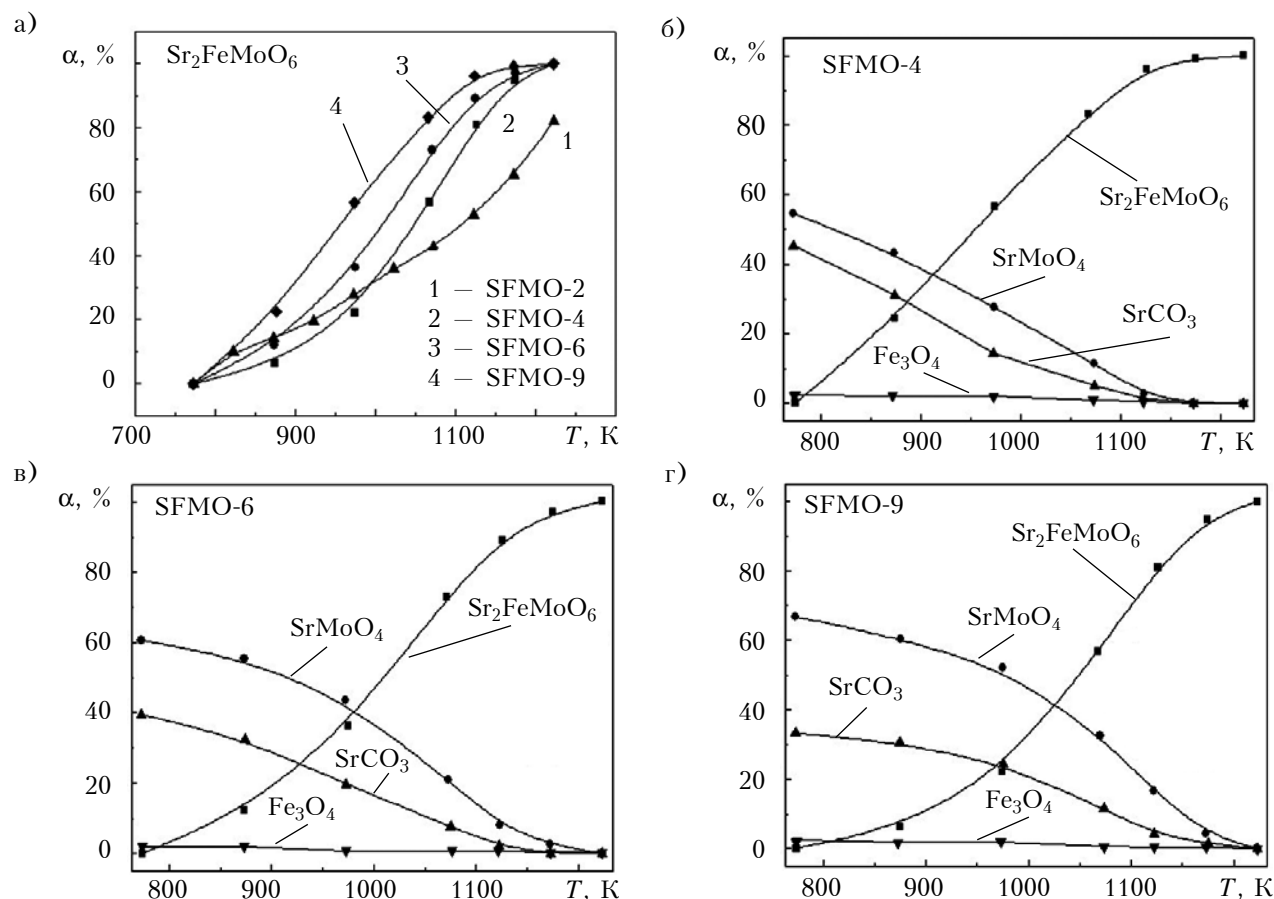


Рис. 1. Изменение с повышением температуры (скорость нагрева 2 К/мин) доли Sr_2FeMoO_6 в порошках SFMO-2, -4, -6, -9 (а), а также доли других фаз, содержащихся в этих порошках (б, в, г)

турным упорядочением катионов Fe^{3+} и Mo^{5+} уже при температуре 1223 К. Это хорошо видно из сопоставления рентгеновских спектров,

представленных на **рис. 2**, где для образцов SFMO-4, -6, -9 появляются рефлексы (011) и (013) сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo различной интенсивности (см. вставку).

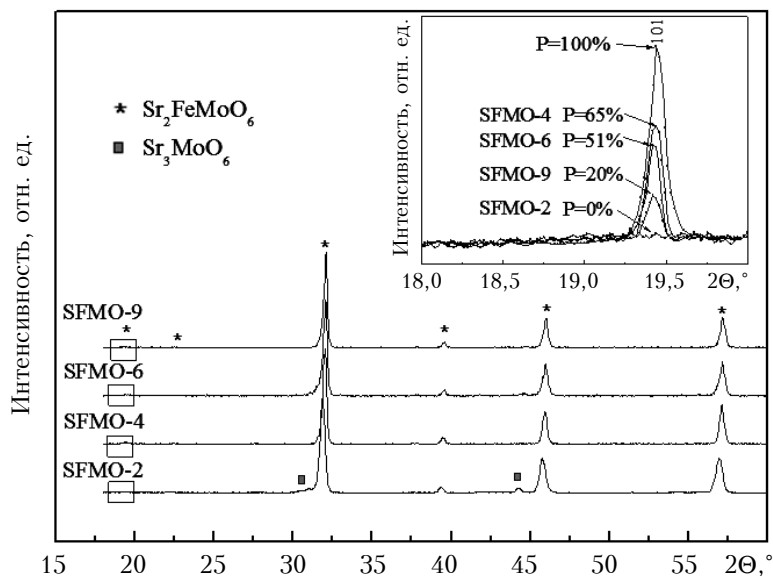


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы исследованных порошков, представленные в диапазоне углов $2\theta = 16 - 60^\circ$ (на вставке — в диапазоне $18 - 20^\circ$, пик (011))

При использовании данных рентгеноструктурного анализа и с помощью программы FullProf были получены значения степени сверхструктурного упорядочения P катионов Fe^{3+} и Mo^{5+} : 0% для SFMO-2; 65% для SFMO-4; 51% для SFMO-6; 20% для SFMO-9.

Электронно-микроскопические исследования порошков после их диспергирования показали, что размер частиц соединения $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ больше в порошках, синтезированных из растворов с более высокими значениями pH. Установлена также тенденция к агрегации зерен $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ при увеличении температуры в процессе отжига порошков, проводимого в политемпературном режиме в интервале $T = 300 - 1220 K$.

На **рис. 3** показана морфология зерен ферромolibдата строн-

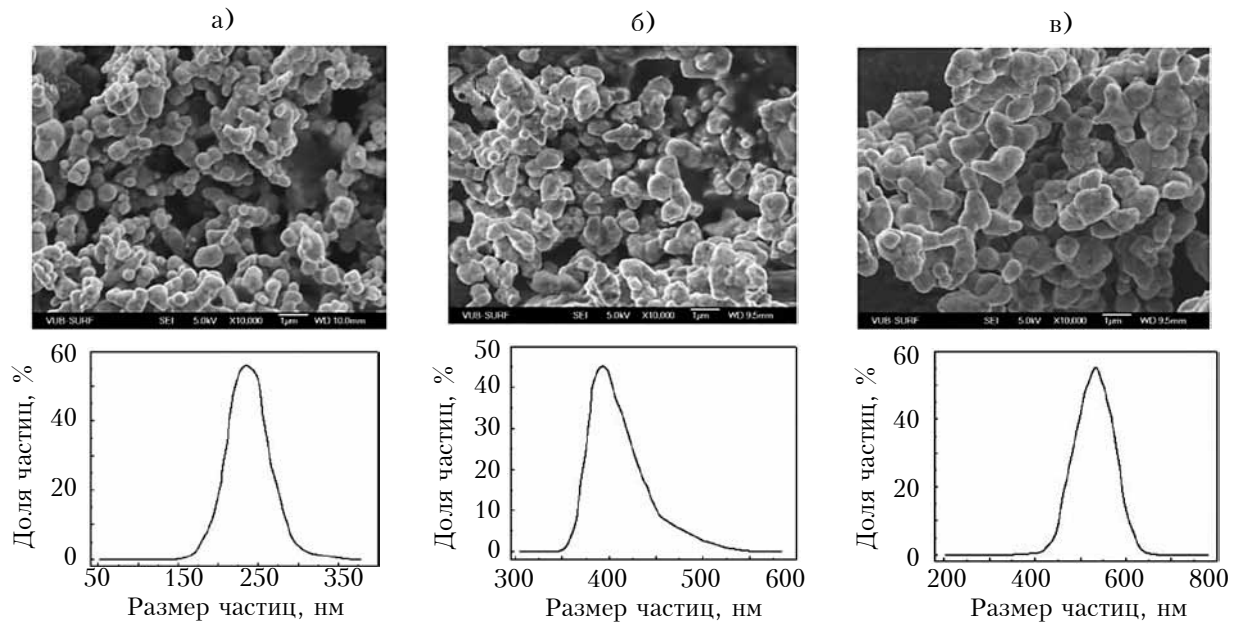


Рис. 3. Микроструктура и распределение частиц по размерам, полученные для порошков SFMO-4 (а), SFMO-6 (б) и SFMO-9 (в) после их отжига в политермическом режиме при $T = 300 - 1220$ К

ция, полученных из растворов с разными pH, а также результаты ДРС-анализа, с помощью которого были установлены размеры частиц порошков. Как видно из рисунка, для SFMO-4 они лежат в диапазоне 150–300 нм, при этом около 50% частиц имеют размер около 240 нм; для SFMO-6 — в диапазоне 350–550 нм с максимальным распределением около 400 нм; для SFMO-9 — в диапазоне 420–640 нм с максимумом распределения 520 нм. Достаточно узкий диапазон, в котором лежат размеры частиц каждого из порошков, указывает на определенную зависимость их микроструктуры и магнитных свойств от условий синтеза.

Анализ температурных зависимостей намагниченности M порошков, измеренных в магнитном поле с магнитной индукцией 0,15 Тл (рис. 4, а),

позволил заключить, что образцы SFMO-4, -6 и -9, имеющие различную степень P сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Мо, являются ферримагнетиками с температурой Кюри 424, 413 и 406 К соответственно (значения T_C определялись с использованием зависимостей $(M/M_0)^2 = f(T)$, как это показано на рис. 4, б). С величиной P хорошо коррелируют значения намагниченности: $M_{\text{SFMO-4}} = 0,46$ мБ/ф.е., $M_{\text{SFMO-6}} = 0,41$ мБ/ф.е. и $M_{\text{SFMO-9}} = 0,36$ мБ/ф.е. при $T = 300$ К.

В порошках, намагниченность которых в достаточной степени однородна, наличие низкоразмерных зерен (с размерами ниже критического $V_{\text{кр}}$ [16, 17]) способствует реализации суперпарамагнитного состояния в ферромолибдате стронция, которое приводит к резкому росту

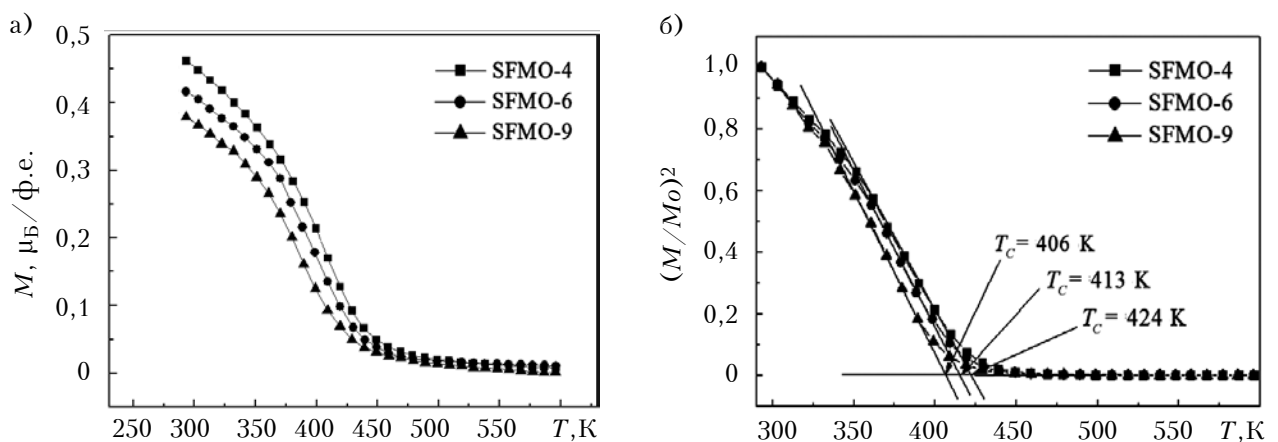


Рис. 4. Температурные зависимости намагниченности порошков SFMO-4, -6 и -9, измеренные в магнитном поле с $B = 0,15$ Тл (а) и температурная зависимость квадрата нормированной намагниченности

намагниченности охлажденных до 4,2 К нанопорошков при включении даже слабого магнитного поля и увеличении температуры до определенного значения T_S . Это обусловлено тем, что величина потенциального барьера образца, помещенного во внешнее магнитное поле, становится выше энергии тепловых колебаний атомов, и поэтому процесс перемагничивания суперпарамагнитных зерен объемом меньше некоторого критического значения происходит когерентно: их спины поворачиваются так, что все время остаются ориентированными параллельно друг другу, тогда как величина магнитного поля недостаточна для перемагничивания несуперпарамагнитных зерен. При увеличении температуры выше T_S наблюдается более плавный рост намагниченности материала, что, скорее всего, обусловлено вкладом в ее величину размороженных спинов электронов несуперпарамагнитных зерен.

Согласно приведенным на рис. 3 распределениям частиц по размерам, количество частиц, размеры которых меньше $V_{кр}$ и, следовательно, обладающих суперпарамагнитными свойствами, в порошке SFMO-4 больше, чем в SFMO-6 и SFMO-9, поэтому и увеличение намагниченности

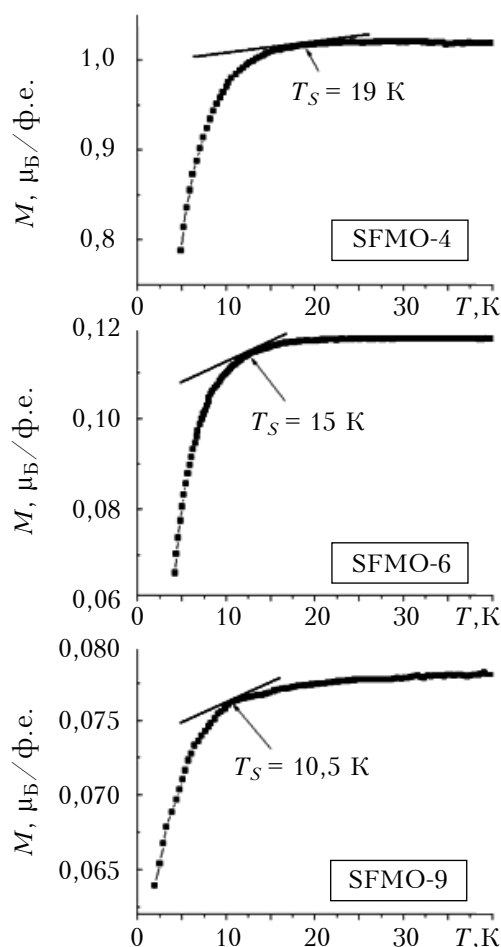


Рис. 5. Температурные зависимости намагниченности исследованных порошков, измеренные при $B = 0,01$ Тл

в нем при включении слабого магнитного поля и последующем нагреве происходит резче: на 29% в SFMO-4; 26% в SFMO-6; 16% в SFMO-9 (рис. 5).

Следует отметить, что суперпарамагнитные свойства в двойном перовските $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, содержащем сферические зерна размером 20–100 нм, наблюдали также и авторы [18].

В процессе исследований было выдвинуто логичное, на первый взгляд, предположение, что магнитно-неоднородное состояние с ферромагнитным упорядочением спинов катионов Fe и Mo ближнего порядка способствует фрустрации обменных связей и реализации состояния спинового стекла в порошках $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, при котором инверсия спинов не изменяет энергию системы в широком интервале температур. Однако исследования это предположение не подтвердили. Проведенная аппроксимация экспериментальных зависимостей намагниченности функцией, представляющей собой сумму функции Ланжевена и функции, отвечающей парамагнитному поведению невзаимодействующих ионов (закон Кюри) с магнитным моментом, равным магнитному моменту иона примеси (см. рис. 6), показала реализацию метастабильного суперпарамагнитного состояния в наноразмерных зернах $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$. Теоретическая зависимость намагниченности от величины напряженности приложенного магнитного поля представлена в следующем виде:

$$M(H, T) = N\mu_B L + \beta H,$$

где N — число невзаимодействующих магнитных частиц в объеме V с магнитным моментом μ ;

L — функция Ланжевена,

$$L = \coth[\mu_B H / (Tk)] - 1/[\mu_B H / (Tk)];$$

k — постоянная Больцмана;

β — коэффициент аппроксимации.

На отсутствие состояния спинового стекла в образцах SFMO-4, -6 и -9 указывают температурные зависимости намагниченности образцов при их нагреве в различных магнитных полях.

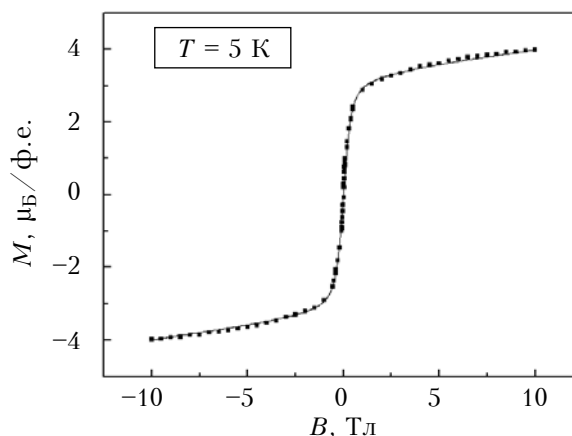


Рис. 6. Аппроксимация экспериментальных значений намагниченности порошка SFMO-4

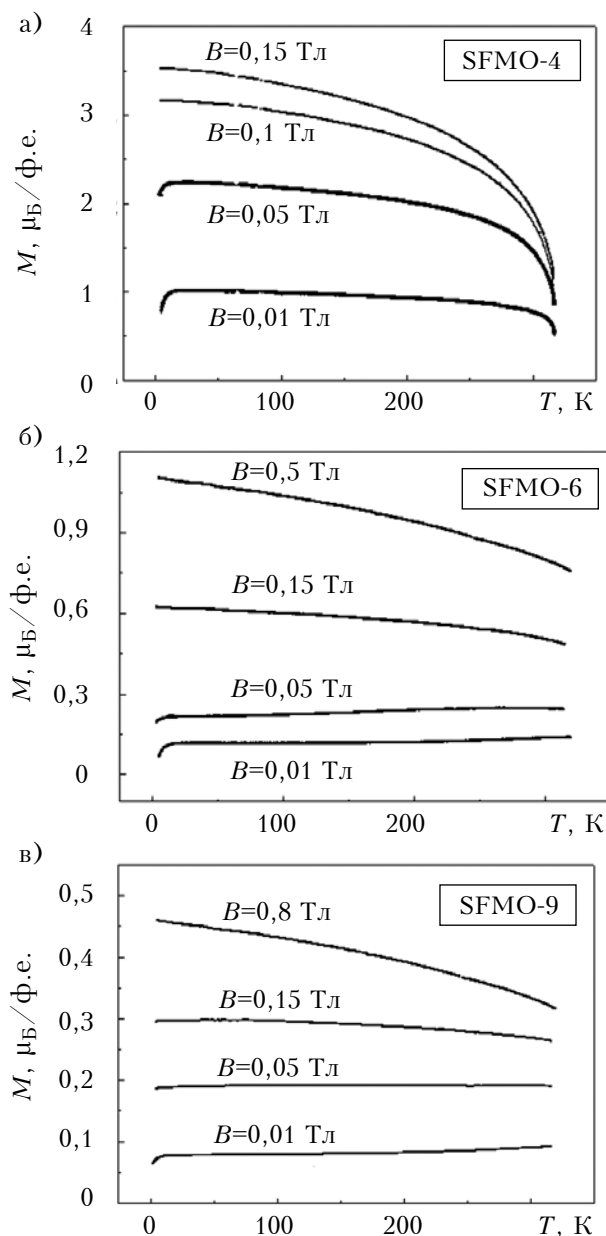


Рис. 7. Температурные зависимости намагниченности исследованных образцов, измеренные при различной величине магнитного поля

Как видно на **рис. 7**, для всех образцов значения T_S зависят от величины B , и с увеличением магнитного поля они сдвигаются в сторону более низких температур, что обусловлено уменьшением величины энергетического барьера при приложении внешнего магнитного поля. Приведенные на рисунке данные указывают на решающую роль индукции магнитного поля в переманчивании $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$: при ее увеличении намагниченность материалов возрастает.

Выводы

Проведенные исследования позволили установить корреляцию условий получения, микроstructures и магнитных характеристик нанок-

рамики со структурой двойного перовскита на основе соединения $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$. Полученные результаты открывают перспективы управления эффектами гигантского и туннельного магнетосопротивления, температурой Кюри, намагниченностью насыщения, коэрцитивной силой и степенью сверхструктурного упорядочения путем изменения технологических режимов синтеза ферромolibдата стронция, и помогут в решении ряда проблем, возникающих при разработке магнитоуправляемых устройств для электронной техники, связанных с их стабильностью и надежностью.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Fix T., Barla A., Ulhaq-Bouillet C. et al. Absence of tunnel magnetoresistance in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ -based magnetic tunnel junctions // *Chem. Phys. Lett.* — 2007. — Vol. 434, iss. 4-6. — P. 276–279. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.cplett.2006.12.020>
2. Kovalev L., Yarmolich M., Petrova M. et al. Double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ films prepared by electrophoretic deposition // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* — 2014. — Vol. 6, N 21. — P. 19201–19206. — <http://dx.doi.org/10.1021/am5052125>
3. Niebieskikwiat D., Caneiro A., Sánchez R. D., Fontcuberta J. Oxygen-induced grain boundary effects on magnetotransport properties of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ // *Phys. Rev. B.* — 2001. — Vol. 64, iss. 18. — P. 1804061–1804064. — <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.64.180406>
4. Huang Y. H., Lindén J., Yamauchi H., Karppinen M. Large low-field magnetoresistance effect in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ homocomposites // *Appl. Phys. Lett.* — 2005. — Vol. 86, iss. 7. — P. 0725101–07251013. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.1864241>
5. Kalanda N.A., Gorokh G.G., Yarmolich M.V. et al. Magnetic and magnetoresistive properties of Al_2O_3 - $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ - Al_2O_3 nanoheterostructures // *Phys. Solid State.* — 2016. — Vol. 58, iss. 2. — P. 341–349. — <http://dx.doi.org/10.1134/S1063783416020128>
6. Shinde S.R., Ogale S.B., Greene R.L. et al. Thin films of double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$: Growth, optimization, and study of the physical and magnetotransport properties of films grown on single-crystalline and polycrystalline SrTiO_3 substrates // *J. Appl. Phys.* — 2003. — Vol. 93, iss. 3. — P. 1605–1612. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.1533831>
7. Santiso J., Figueras A., Fraxedas J. Thin films of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ grown by pulsed laser deposition: preparation and characterization // *Surf. Interface Anal.* — 2002. — Vol. 33, iss. 33. — P. 676–680. — <http://dx.doi.org/10.1002/sia.1435>
8. Sarma D. D., Mahadevan P., Ray S., Kumar A. Electronic Structure of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ // *Phys. Rev. Lett.* — 2000. — Vol. 85, iss. 12. — P. 2549–2552. — <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.2549>
9. Klencsár Z., Németh Z., Vértés A. et al. The effect of cation disorder on the structure of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ double perovskite // *J. Magn. Magn. Mater.* — 2004. — Vol. 281, iss. 1. — P. 115–123. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.04.097>
10. Rager J., Zipperle M., Sharma A., MacManus-Driscoll J. L. Oxygen stoichiometry in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$, the determination of Fe and Mo valence states, and the chemical phase diagram of $\text{SrO}-\text{Fe}_3\text{O}_4-\text{MoO}_3$ // *J. Am. Ceram. Soc.* — 2004. — Vol. 87, iss. 7. — P. 1330–1335. — <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.2004.tb07730.x>

11. Kang J.-S., Kim J. H., Sekiyama A. et al. Bulk-sensitive photoemission spectroscopy of $A_2\text{FeMoO}_6$ double perovskites ($A=\text{Sr}, \text{Ba}$) // Phys. Rev. B. — 2002. — Vol. 66, iss. 11. — P. 1131051-11310514. — <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.66.113105>

12. Kalanda N.A., Kovalev L.V., Waerenborgh J.C. et al. Interplay of superstructural ordering and magnetic properties of the $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ double perovskite // Science of Advanced Materials. — 2015. — Vol. 7, N 3. — P. 446–454. — <http://dx.doi.org/10.1166/sam.2015.2134>

13. Topwal D., Sarma D. D., Kato H. et al. Structural and magnetic properties of $\text{Sr}_2\text{Fe}_{1-x}\text{Mo}_x\text{O}_6$ ($-1 \leq x \leq 0.25$) // Phys. Rev. B. — 2006. — Vol. 73, iss. 9. — P. 0944191-0944195. — <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.73.094419>

14. Kobayashi K.-I., Kimura T., Sawada H. et al. Room-temperature magnetoresistance in an oxide material with an ordered double-perovskite structure // Nature. — 1998. — Vol. 395. — P. 677–680. — <http://dx.doi.org/10.1038/27167>

15. Ярмолич М.В., Каланда Н.А., Демьянов С.Е. и др. Магнетизм в наноразмерных порошках ферромольдата стронция // Доклады БГУИР. — 2016. — №3(97). — С. 63–68.

16. Фролов Г.И., Бачина О.И., Завьялова М.М., Равочкин С.И. Магнитные свойства 3d-металлов // ЖТФ. — 2008. — Т. 78, вып. 8. — С. 101–106.

17. Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю. Магнитные наночастицы: методы получения, строения и свойства // Усп. хим. — 2005. — Т. 74, вып. 6. — С. 539–574.

18. Suominen T., Raittila J., Salminen T. et al. Magnetic properties of fine SFMO particles: Superparamagnetism // J. Magn. Magn. Mater. — 2007. — Vol. 309, iss. 2. — P. 278–284. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.07.016>

Дата поступления рукописи
в редакцию 05.04 2016 г.

М. В. ЯРМОЛИЧ^{1, 3}, к. ф.-м. н. Н. А. КАЛАНДА¹, д. ф.-м. н. С. Е. ДЕМЬЯНОВ¹,
к. ф.-м. н. М. В. СИЛИБИН³, к. т. н. Г. Г. ГОРОХ^{2, 4}

Білорусь, м. Мінськ, ¹НПЦ НАН Білорусі з матеріалознавства, ²БГУІР;
Росія, м. Москва, ³НДУ «МІЕТ», м. Санкт-Петербург, ⁴Університет ІТМО

E-mail: jarmolich@physics.by, kalanda@physics.by, demyanov@physics.by,
pcfme@mieee.ru, gorokh@bsuir.by

СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ НАНОПОРОШКІВ ФЕРРОМОЛІБДАТУ СТРОНЦІЮ З ВИСОКИМ СТУПЕНЕМ НАДСТРУКТУРНОГО УПОРЯДКУВАННЯ ДЛЯ СПІНТРОНІКИ

Нанорозмірну магнітну кераміку зі структурою подвійного перовскіту на основі сполук ферромольдату стронцію (ФМС) $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ синтезовано цитрат-гель-методом з сумісних розчинів з різним значенням рН. Встановлено кореляційну залежність швидкості і ступеня фазових перетворень ФМС внаслідок високотемпературного відпалу. Показано, що на магнітний стан кераміки впливає мікроструктура порошку ФМС і ступінь надструктурного впорядкування катіонів Fe^{3+} , Mo^{5+} , яка істотно залежить від рН вихідного розчину. Встановлено, що при меншій величині рН утворюються наночастинки з більшою мікроструктурною і магнітною однорідністю, а також меншою магнітною анізотропією. Визначено оптимальні умови синтезу нанопорошків ФМС, що дозволяють здійснювати спрямовану зміну фазового складу синтезованої нанорозмірної кераміки з відтворюваними фізико-хімічними властивостями.

Ключові слова: ферромольдат стронцію, цитрат-гель-метод, надструктурне впорядкування катіонів, намагніченість, суперпарамагнітний стан.

DOI: 10.15222/TKEA2016.2-3.41
UDC 544.015.4+537.621.5+ 537.9

M. V. YARMOLICH^{1, 2}, N.A. KALANDA¹,
S. E. DEMYANOV¹, M.V. SILIBIN²,
G.G. GOROKH^{3, 4}

Belarus, Minsk, ¹Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus,
²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics;
Russia, Moscow, ³National Research University of Electronic Technology “MIET”,
St. Petersburg, ⁴ITMO University

E-mail: jarmolich@physics.by, kalanda@physics.by, demyanov@physics.by,
pcfme@mieee.ru, gorokh@bsuir.by

SYNTHESIS AND STUDY OF STRONTIUM FERROMOLYBDATE NANOPOWDERS WITH HIGH DEGREE OF SUPERSTRUCTURAL ORDERING FOR SPINTRONICS

The metal oxide compounds $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ systems with an ordered double perovskite structure due to their unique and extremely important magnetotransport and magnetic properties are among the most promising materials

for spintronic devices. In the present work, we investigated the correlation between the citrate-gel synthesis conditions (pH of initial solutions and annealing temperature) and the microstructure, phase transformations and magnetic properties of the $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ nanopowders. According to the results the average grain size of the powders in the dispersion grows from 250 to 550 nm with increasing of pH values. Single-phase nanosized $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ powders had various degrees of superstructural ordering of Fe^{3+} and Mo^{5+} ($P = 65\%$ for pH = 4, $P = 51\%$ for pH = 6 and $P = 20\%$ for pH = 9). With increasing of pH, the Fe^{2+} concentration increases from 63% to 72%, and the Fe^{3+} concentration drops from 37% to 28%. According to the results of investigations of magnetization temperature dependence in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ powders a metastable superparamagnetic state was established at $T_S < 19$ K in low-dimensional grains. An optimized synthesis procedure, based on an initial solution of pH = 4, has allowed obtaining a single-phase $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ compound having grain size in the range of 50–120 nm and a superstructural ordering of iron and molybdenum cations of 88%. The optimum conditions of synthesis of nanopowders strontium ferromolybdate allow for the directional change of the phase composition of the synthesized nanosized ceramic with reproducible physical and chemical properties.

Keywords: strontium ferromolybdate, citrate-gel method, superstructural ordering, redistribution of the electron density, magnetization, superparamagnetic state.

REFERENCES

1. Fix T., Barla A., Ulhaq-Bouillet C., Colis S., Kappler J.P., Dinia A. Absence of tunnel magnetoresistance in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ -based magnetic tunnel junctions. *Chem. Phys. Lett.*, 2007, vol. 434, iss. 4-6, pp. 276-279. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cplett.2006.12.020>
2. Kovalev L., Yarmolich M., Petrova M., Ustarroz J., Terryn H., Kalanda N., Zheludkevich M. Double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ films prepared by electrophoretic deposition. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2014, vol. 6, no. 21, pp. 19201-19206. <http://dx.doi.org/10.1021/am5052125>
3. Niebieskikwiat D., Caneiro A., Sánchez R. D., Fontcuberta J. Oxygen-induced grain boundary effects on magnetotransport properties of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$. *Phys. Rev. B*, 2001, vol. 64, iss. 18, pp. 1804061-1804064. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.64.180406>
4. Huang Y.H., Lindén J., Yamauchi H., Karppinen M. Large low-field magnetoresistance effect in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ homocomposites. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, vol. 86, iss. 7, pp. 0725101-07251013. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1864241>
5. Kalanda N.A., Gorokh G.G., Yarmolich M.V., Lozovenko A.A., Kanyukov E.Yu. Magnetic and magnetoresistive properties of Al_2O_3 - $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ - Al_2O_3 nanoheterostructures. *Phys. Solid State*, 2016, vol. 58, iss. 2, pp. 341-349. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063783416020128>
6. Shinde S.R., Ogale S.B., Greene R.L., Venkatesan T., Tsoi K., Cheong S.-W., Millis A.J. Thin films of double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$: Growth, optimization, and study of the physical and magnetotransport properties of films grown on single-crystalline and polycrystalline SrTiO_3 substrates. *J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 93, iss. 3, pp. 1605-1612. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1533831>
7. Santiso J., Figueras A., Fraxedas J. Thin films of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ grown by pulsed laser deposition: preparation and characterization. *Surf. Interface Anal.*, 2002, vol. 33, iss. 33, pp. 676-680. <http://dx.doi.org/10.1002/sia.1435>
8. Sarma D. D., Mahadevan P., Ray S., Kumar A. Electronic Structure of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, vol. 85, iss. 12, pp. 2549-2552. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.2549>
9. Klencsár Z., Németh Z., Vértés A., Kotsis I., Nagy M., Cziráki Á., Ulhaq-Bouillet C., Pierron-Bohnes V., Vad K., Mészáros S., Hák J. The effect of cation disorder on the structure of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ double perovskite. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2004, vol. 281, iss. 1, pp. 115-123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.04.097>
10. Rager J., Zipperle M., Sharma A., MacManus-Driscoll J. L. Oxygen stoichiometry in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$, the determination of Fe and Mo valence states, and the chemical phase diagram of $\text{SrO}-\text{Fe}_3\text{O}_4-\text{MoO}_3$. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2004, vol. 87, iss. 7, pp. 1330-1335. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.2004.tb07730.x>
11. Kang J.-S., Kim J. H., Sekiyama A., Kasai S., Suga S., Han S. W., Kim K. H., Muro T., Saitoh Y., Hwang C., Olson C. G., Park B. J., Lee B. W., Shim J. H., Park J. H., Min B. I. Bulk-sensitive photoemission spectroscopy of A_2FeMoO_6 double perovskites (A=Sr, Ba). *Phys. Rev. B*, 2002, vol. 66, iss. 11, pp. 1131051-11310514. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.66.113105>
12. Kalanda N.A., Kovalev L.V., Waerenborgh J.C., Soares M.R., Zheludkevich M.L., Yarmolich M.V., Sobolev N.A. Interplay of superstructural ordering and magnetic properties of the $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ double perovskite. *Science of Advanced Materials*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 446-454. <http://dx.doi.org/10.1166/sam.2015.2134>
13. Topwal D., Sarma D. D., Kato H., Tokura Y., Avignon M. Structural and magnetic properties of $\text{Sr}_2\text{Fe}_{1+x}\text{Mo}_{1-x}\text{O}_6$ ($-1 \leq x \leq 0.25$). *Phys. Rev. B*, 2006, vol. 73, iss. 9, pp. 0944191-0944195. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.73.094419>
14. Kobayashi K.-I., Kimura T., Sawada H., Terakura K., Tokura Y. Room-temperature magnetoresistance in an oxide material with an ordered double-perovskite structure. *Nature*, 1998, vol. 395, pp. 677-680. <http://dx.doi.org/10.1038/27167>
15. Yarmolich M.V., Kalanda N.A., Dem'yanov S.E., Gurskii L.I., Kovalev L.V., Galyas A.I. [Magnetism in nanoscale powders of ferro strontium molybdate]. *Doklady BGUIR*, 2016, no. 3(97), pp. 63-68. (Rus)
16. Frolov G. I., Bachina O. I., Zav'yalova M. M., Ravochkin S. I. Magnetic properties of nanoparticles of 3d metals. *Technical Physics*, 2008, vol. 53, iss. 8, pp. 1059-1064. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063784208080136>
17. Gubin S. et al. Magnetic nanoparticles: preparation, structure and properties. *Russian Chemical Reviews*, 2005, vol. 74, iss. 6, pp. 489-520. <http://dx.doi.org/10.1070/RC2005v074n06ABEH000897>
18. Suominen T., Raittilä J., Salminen T., Schlesier K., Lindén J., Paturi P. Magnetic properties of fine SFMO particles: Superparamagnetism. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2007, vol. 309, iss. 2, pp. 278-284. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.07.016>

К. т. н. А. П. АЛИЕВА¹, к. ф.-м. н. С. Ш. КАХРАМАНОВ¹, к. ф.-м. н. А. Ш. КАХРАМАНОВ²

Азербайджан, г. Баку, ¹Азербайджанский технический университет,

²Бакинский государственный университет

E-mail: almaz46@mail.ru

ВЛИЯНИЕ САМОИНТЕРКАЛЯЦИИ МЕДИ НА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ $\text{Bi}_2\text{Te}_3<\text{Cu}>$ В ПРОЦЕССЕ ИХ ХРАНЕНИЯ

Исследовано изменение термоэлектрических свойств кристаллов $\text{Bi}_2\text{Te}_3<\text{Cu}>$, легированных висмутом и индием, во время их хранения. Показано, что это связано с самопроизвольным перетеканием атомов Cu, осевших в начальный период кристаллизации между слоями $\text{Te}^{(2)}-\text{Bi}$, $\text{Bi}-\text{Te}^{(2)}$ и в дефектных центрах, перпендикулярно поверхности кристалла (0001), которое завершается образованием диссипативных наноструктур. Установлено, что наиболее значительно изменяются термоэлектрические свойства кристаллов, легированных индием.

Ключевые слова: термоэлектрические материалы, дефектные центры, кристаллы, диссипативные наноструктуры.

Для улучшения термоэлектрических свойств термоэлементов необходимо использовать пространственно неоднородные материалы, размеры неоднородностей которых сравнимы с характерной длиной волны электрона или фонона, т. е. лежат в нанометровой области. Для достижения максимальной термоэлектрической добротности термоэлектрических материалов необходимо стремиться к тому, чтобы электронная проводимость была как можно большей при наименьшей теплопроводности. Теплопроводность же может быть значительно уменьшена при рассеивании теплового потока на границах раздела.

С этой точки зрения интересны слоистые кристаллы Bi_2Te_3 , которые широко применяются в термоэлектрических элементах, а также в датчиках теплового потока и ИК-излучения. Они имеют гексагональную ячейку, состоящую из набора сравнительно далеко отстоящих друг от друга слоев-квинтетов. Расстояние $\text{Te}^{(1)}-\text{Te}^{(1)}$ в них намного больше расстояний $\text{Bi}-\text{Te}^{(1)}$ и $\text{Bi}-\text{Te}^{(2)}$. С другой стороны, расположение слоев-квинтетов и их дефектная атомная структура влияют на особенности электронных свойств соединений типа $A_2^{\text{V}}B_3^{\text{VI}}$ [1], легированных легкодиффундирующими примесями [2].

Наличие ван-дер-ваальсовой связи между слоями $\text{Te}^{(1)}-\text{Te}^{(1)}$ влияет не только на механическую прочность материала, но также играет роль пространственного ограничителя при локализации фононов, что уменьшает теплопроводность материала и увеличивает его термоэлектрическую эффективность [3, 4]. Слоистый характер кристаллической структуры матрицы Bi_2Te_3 делает возможным при добавлении в нее атомов меди перемещение их из положений центров внедрения, где они находятся в активном донорном состоянии, в ван-дер-ваальсовы щели

между пятислойными пакетами. При этом атомы Cu упорядочиваются и становятся электрически нейтральными и образуют наноструктуры. Вызывает интерес возможность управления ограничением распространения фононов с помощью варьирования расстояния $\text{Te}^{(1)}-\text{Te}^{(1)}$ при внедрении примесей и сверхстехиометрического избытка в межслоевое пространство, из нанофрагментов которых формируются наноструктуры различных форм и размеров [5]. В наноструктурах этот эффект будет оказывать влияние на взаимодействие фононов как друг с другом, так и с носителями зарядов.

Целью настоящей работы являлось выявление фрактальных нанофрагментов в межслоевом пространстве кристаллов $\text{Bi}_2\text{Te}_3<\text{Cu}>$, легированных висмутом и индием, установление их влияния на электрические свойства образцов и особенностей межслоевых диффузионных процессов при самоинтеркаляции.

Исследовались кристаллы $\text{Bi}_2\text{Te}_3<\text{Cu}>$, массовое содержание меди в которых составляло 0,05%. Для образцов кристаллов с различным содержанием примесей (Bi, In) были исследованы временные зависимости термо-эдс α и электропроводности σ .

Изучение изменения α и σ образцов $\text{Bi}_2\text{Te}_3<\text{Cu}>$, $\text{Bi}_2\text{Te}_3<\text{Cu}, \text{Bi}>$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_3<\text{Cu}, \text{In}>$ во время хранения при $T=300$ К в вакууме и на воздухе показало, что электрическая активность меди зависит от содержания компенсирующей примеси: висмута или индия.

Как видно из рис. 1, а, термо-эдс кристалла $\text{Bi}_2\text{Te}_3<\text{Cu}>$ с концентрацией электронов $n = 6,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (образец № 1) увеличивается в течение первых десяти дней и затем стабилизируется. В кристалле $\text{Bi}_2\text{Te}_3<\text{Cu}, \text{Bi}>$ с массовой долей висмута 0,05% (образец № 2) изменения

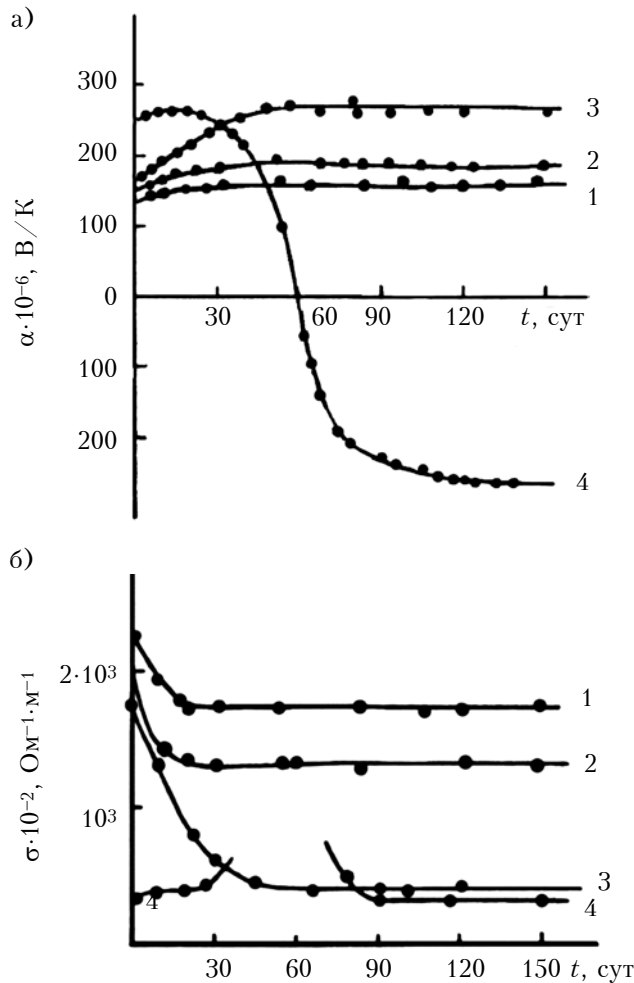


Рис. 1. Зависимость термо-эдс (а) и электропроводности (б) от времени хранения t при $T = 300$ К кристаллов $\text{Bi}_2\text{Te}_3<\text{Cu}>$ без избытка примесей (1) и содержащих 0,05 мас.% Bi (2), 0,1 мас.% Bi (3) и 0,1 мас.% In (4)

происходят в течение 30 суток, а при его содержании 0,1% (образец № 3) равновесное состояние наступает после 40 суток. Отметим, что изменения термо-эдс коррелируют с изменениями электропроводности — если термо-эдс растет, то уменьшается электропроводность, при этом концентрация электронов падает (например, для образца № 3 с $3,2 \cdot 10^{19}$ до $6,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

Особенно значительными были изменения термо-эдс кристаллов, легированных индием ($\text{Bi}_2\text{Te}_3<\text{Cu}, \text{In}>$, образец № 4): после двухмесячного хранения в них менялся знак термо-эдс (кривая 4 на рис. 1, а), а величина электропроводности изменялась на 6 порядков (кривая 4 на рис. 1, б). По истечении этого срока их свойства стабилизировались.

В системе $\text{Bi}_2\text{Te}_3<\text{Cu}>$ процесс интеркаляции в фазовом пространстве $\text{Te}^{(1)} - \text{Te}^{(1)}$ теллурида висмута проведен в двух наблюдаемых крайностях — беспорядок и порядок. В основе этих процессов лежит первичное накопление атомов Cu в решетке Bi_2Te_3 во всех дефектных структурах: вакансиях

Bi или Te, в квинтетах между слоями $\text{Te}^{(2)} - \text{Bi}$, $\text{Bi} - \text{Te}^{(1)}$, а также, в некоторой степени, и в пространстве $\text{Te}^{(1)} - \text{Te}^{(1)}$ в начальный момент времени после завершения кристаллизации. Со временем при $T = 300$ К начинается стекание атомов Cu из всех дефектных мест, в которых они располагались неупорядоченно, и продолжается тепловое перемещение всех оставшихся в слоях атомов Cu в пространство $\text{Te}^{(1)} - \text{Te}^{(1)}$. Процесс перехода атомов Cu сопровождается образованием упорядоченных межслоевых элементов, фракталов и фрактальных поверхностей, т. е. здесь наблюдается переход «беспорядок — порядок» [2].

Пути хаотической диффузии атомов Cu, их перемещение в зону $\text{Te}^{(1)} - \text{Te}^{(1)}$ и пути агрегации на плоскости (0001) с образованием нанобъектов демонстрирует схема, представленная на рис. 2.

В состоянии, далеко от равновесия (рис. 2 иллюстрирует именно неравновесный переход), очень слабые флуктуации могут скачкообразно переводить исходную структуру Bi_2Te_3 в структуру с межслоевыми элементами со сложной разрушающейся внутрислойной структурой в це-

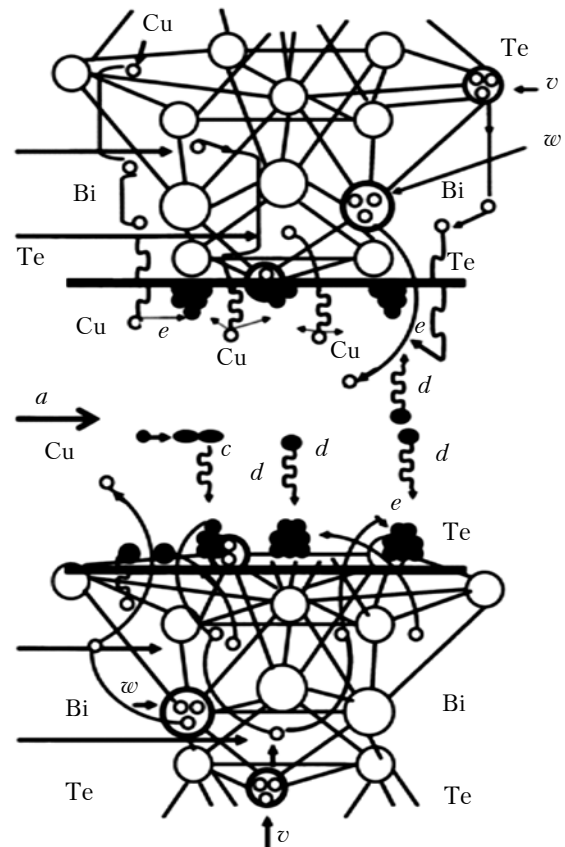


Рис. 2. Схема расположения атомов в слоистой структуре теллурида висмута при самоинтеркаляции меди: a — направление диффузии атомов Cu вдоль плоскости (0001) при кристаллизации и при интеркаляции; c — агрегация частиц в межслоевом пространстве; d — диффузия частиц на плоскость (0001); e — направление перемещения Cu из квинтетов в межслоевое пространство $\text{Te}^{(1)} - \text{Te}^{(1)}$ при самоинтеркаляции; v — вакансии Te в слоях; w — вакансии Bi в слоях

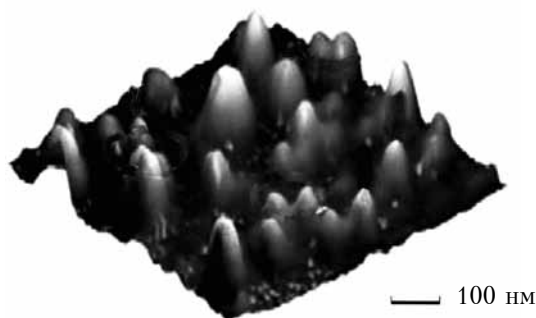


Рис. 3. АСМ-изображение поверхности (0001) $A_2^V B_3^{VI}$ с нанобъектами

лом. Такие сложные морфологические структуры могут изменяться в процессе самоинтеркаляции очень малого количества атомов Cu в слой $Te^{(1)}-Te^{(1)}$ из других слоев, выступы сливаются, образуя более крупные. Межслоевые нанобразования Cu характеризуются взаимодействием друг с другом. Рассмотренные эффекты могут считаться особенностями процессов самоорганизации в системах с образованием межслоевых диссипативных наноструктур (рис. 3).

Таким образом, проведенные исследования подтвердили неустойчивость примесных центров в слоистых системах $Bi_2Te_3<Cu>$. Особенно значительными были изменения с течением времени в кристаллах, легированных индием ($Bi_2Te_3<Cu, In>$): после двухмесячного хранения в них менялся знак термо-эдс, а величина теплопроводности менялась на шесть порядков. По истечении двух месяцев свойства стабилизировались и образцы имели та-

кие же свойства, как $p-Bi_2Te_3$, легированный 0,1% In с $\alpha = +250$ мкВ/К и $\beta = 330$ Ом⁻¹·см⁻¹.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Urazhdin S., Bilc D., Mahanti S. D. et al. Surface effects in layered semiconductors Bi_2Se_3 and Bi_2Te_3 // Phys. Rev. B. — 2004. — Vol. 69, iss. 8, 085313. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.69.085313>
2. Алескерев Ф.К., Кахраманов С.Ш. Влияние межслоевых металлических наноплазмонных структур на кинетические свойства $Bi_2Te_3<Cu, Ni>$ // Металлофизика и новейшие технологии. — 2008. — Т. 30, № 11. — С. 1465–1477.
3. Yanyuan Zhao, Xin Luo, Jun Zhang et al. Interlayer vibrational modes in few-quintuple-layer Bi_2Te_3 and Bi_2Se_3 two-dimensional crystals: Raman spectroscopy and first-principles studies // Phys. Rev. B. — 2014. — Vol. 90, iss. 24, 245428. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.90.245428>
4. Qiu B., Ruan X. Thermal conductivity prediction and analysis of few-quintuple Bi_2Te_3 thin films: a molecular dynamics study // Appl. Phys. Lett. — 2010. — Vol. 97, iss. 18, 183107. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3514252>
5. Chiritescu C., Mortensen C., Cahill D.G. et al. Lower limit to the lattice thermal conductivity of nanostructured Bi_2Te_3 based materials // J. Appl. Phys. — 2009. — Vol. 106, iss. 7, 073503. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3226884>
6. Froberg G., Adam P. Theory of faceting // Thin Solid Films. — 1975. — Vol. 25, N 2. — P. 525–530. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-6090\(75\)90070-X](http://dx.doi.org/10.1016/0040-6090(75)90070-X)
7. Кронов Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. — Москва: Постмаркет, 2000.
8. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. — Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2001.

Дата поступления рукописи
в редакцию 14.03 2016 г.

А. П. АЛИЕВА¹, С. Ш. КАХРАМАНОВ¹, А. Ш. КАХРАМАНОВ²

Азербайджан, м. Баку, ¹Азербайджанский технический университет,

²Бакинский государственный университет

E-mail: almaz46@mail.ru

ВПЛИВ САМОІНТЕРКАЛЯЦІ МІДІ НА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛЕГОВАНИХ КРИСТАЛІВ $Bi_2Te_3<Cu>$ ПІД ЧАС ЇХ ЗБЕРІГАННЯ

Досліджено зміну термоелектричних властивостей кристалів $Bi_2Te_3<Cu>$, легованих вісмутом та індієм, під час їх зберігання. Показано, що це пов'язано з самовільним перетіканням атомів Cu, які осіли в початковий період кристалізації між шарами $Te^{(2)}-Bi$, $Bi-Te^{(2)}$ та в дефектних центрах, перпендикулярно поверхні кристала (0001), яке завершується утворенням дисипативних наноструктур. Встановлено, що найбільш істотно змінюються термоелектричні властивості кристалів, легованих індієм.

Ключові слова: термоелектричні матеріали, дефектні центри, кристали, дисипативні наноструктури.

DOI: 10.15222/TKEA2016.2-3.49

UDC 546.87/86"24:54-165

A. P. ALIYEVA¹, S. Sh. GAHRAMANOV¹,

A. Sh. GAHRAMANOV²

Azerbaijan, Baku, ¹Azerbaijan Technical University, ²Baku State University

E-mail: almaz46@mail.ru

INFLUENCE OF COPPER INTERCALATION ON THERMOELECTRIC PROPERTIES CHANGE IN $Bi_2Te_3<Cu>$ DOPED CRYSTALS DURING STORAGE

The authors investigate the change in the thermoelectric properties of $Bi_2Te_3<Cu>$ crystals doped by bismuth and indium during their storage. It is shown that such change is caused by the spontaneous overflow of Cu

atoms deposited during the initial crystallization period between $Te^{(2)}-Bi$ and $Bi-Te^{(2)}$ layers, and in defect centers perpendicularly to the surface of the crystal (0001), which culminates in the formation of dissipative nanostructures. It was found that thermoelectric properties of crystals doped with indium undergo the most significant change.

Keywords: thermoelectric materials, defect centers, crystals, dissipative nanostructures..

REFERENCES

1. Urazhdin S., Bilc D., Mahanti S. D., Tessmer S. H., Theodora Kyratsi, M. G. Kanatzidis. Surface effects in layered semiconductors Bi_2Se_3 and Bi_2Te_3 . *Phys. Rev. B* 69, 085313, 2004. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.69.085313>
2. Aleskerov F.K., Gahramanov S.Sh. Influence of interlayer metal nano fragments on the kinetic properties of $Bi_2Te_3<Cu, Ni>$. *Physics of Metals and Advanced Technologies*, 2008, vol. 30, no. 11, pp.1465-1477.
3. Yanyuan Zhao, Xin Luo, Jun Zhang, Junxiong Wu, Xuxu Bai, Meixiao Wang, Jinfeng Jia, Hailin Peng, Zhongfan Liu, Su Ying Quek, Qihua Xiong. Interlayer vibrational modes in few-quintuple-layer Bi_2Te_3 and Bi_2Se_3 two-dimensional crystals: Raman spectroscopy and first-principles studies. *Phys. Rev. B* 90, 245428, 2014. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.90.245428>
4. Qiu B., Ruan X., Thermal conductivity prediction and analysis of few-quintuple Bi_2Te_3 thin films: a molecular dynamics study. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, 183107, 2010. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3514252>
5. Chiritescu C., Mortensen C., Cahill D.G., Johnson D., Zschack P. Lower limit to the lattice thermal conductivity of nanostructured Bi_2Te_3 based materials. *J. Appl. Phys.* vol. 106, 073503, 2009. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3226884>
6. Froberg G., Adam P. Theory of faceting. *Thin Solid Films*, 1975, vol. 25, iss. 2, pp. 525-530. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-6090\(75\)90070-X](http://dx.doi.org/10.1016/0040-6090(75)90070-X)
7. Crownover R.M. *Introduction to Fractals and Chaos*. Boston: MA Jones & Bartlett, 1995, 306 p.
8. Schroeder M. *Fractals, chaos, power laws: Minutes from an infinite paradise*. New York: W.H. Freeman, 1991, 429 p.

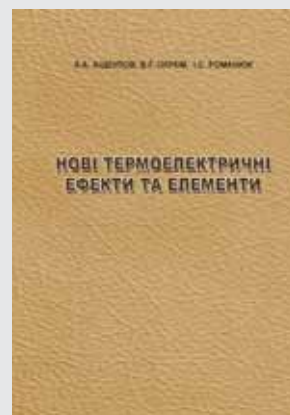
НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Ащеулов А. А., Охрем В. Г., Романюк И. С. Новые термоэлектрические эффекты и элементы (на украинском языке).— Черновцы: Издательский дом «Родовід», 2015.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований некоторых новых физических явлений и эффектов в термоэлектрически неоднородных и анизотропных средах. К ним относятся Umkehr-эффект, а также явления объемной термо-эдс и Бриджмена. Их использование позволило предложить и создать ряд оригинальных холодильных элементов. Рассмотрены также новые аспекты явления вихревых термоэлектрических токов, на основании которых предложен оригинальный подход к проблеме термоэлектрического преобразования энергии. Полученные результаты обусловили появление ряда перспективных генераторных и холодильных элементов.

Для ученых, занимающихся термоэлектричеством, инженеров-разработчиков термоэлектрических приборов, а также для преподавателей, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.



К. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО, к. т. н. Т. Н. НАРЫТНИК

Украина, г. Киев, НПП «Сатурн»

E-mail: gen-nto@ukr.net

РОЛЬ ЛИЧНОСТИ В НАУЧНОМ ПРОГРЕССЕ (к 80-летию со дня рождения Л. Г. Гассанова)

Статья посвящена Льву Гассановичу Гассанову, который с 1974 до 1991 года возглавлял НИИ «Сатурн». Незаурядная личность, талантливый руководитель, организатор и ученый, автор многих монографий, научных работ и изобретений, он основал отечественную школу по созданию широкого класса приборов, устройств и систем микромощной электроники.

Ключевые слова: Л. С. Гассанов, НИИ «Сатурн», СВЧ-электроника, микромощная электроника, диэлектроника.

Общеизвестно, что прогресс и перспективы дальнейшего развития в любой области деятельности общества определяются наличием активного и целеустремленного лидера. В области СВЧ-электроники и радиофизики в Украине таким прогрессивным лидером был Лев Гассанович Гассанов — профессор, доктор технических наук, член-корреспондент Национальной академии наук Украины, лауреат Государственной премии Украины и СССР в области науки и техники, основатель отечественной школы по созданию широкого класса приборов, устройств и систем микромощной электроники, автор многих монографий, научных работ и изобретений.

Л. Г. Гассанов родился 28 апреля 1936 года в Ашхабаде, откуда после печально известного землетрясения 1948 года семья переехала в Киев. Здесь он окончил школу, а в 1959 году — Киевский политехнический институт, получив

диплом радиоинженера. Инженерная и научная карьера Л. Г. Гассанова началась в Институте радиотехнических проблем Академии наук Украины (НИИ РТП, ныне НИИ «Орион»).

Активная творческая позиция и работоспособность позволили Л. Г. Гассанову очень скоро стать ведущим специалистом института, а к середине шестидесятых годов защитить кандидатскую диссертацию и возглавить научно-исследовательскую лабораторию. В мае 1974 года Л. Г. Гассанов был назначен директором НИИ «Сатурн», которым руководил до декабря 1991 года и где полностью раскрылся его талант как ученого, руководителя отрасли и общественного деятеля.

Еще в НИИ «Орион» Лев Гассанович начал активно исследовать тогда еще совсем «экзотический» диапазон миллиметровых волн и в 1976 году (уже будучи директором НИИ «Сатурн») защитил докторскую диссертацию, а в 1990-м был избран член-корреспондентом Национальной академии наук Украины. За выдающиеся научные достижения Л. Г. Гассанов был удостоен звания Лауреата Государственных премий СССР и Украины в области науки и техники.

Специалисты НИИ «Сатурн» всегда очень внимательно изучали публикации в иностранных журналах по микроволновой технике и электронике. Эти публикации иногда просто поражали воображение высоким уровнем достижений. Конечно же, уровень развития радиоэлектроники в США, Японии и в отдельных европейских странах в целом был выше, чем в СССР, но по отдельным направлениям, в том числе по маломощным СВЧ-усилительным устройствам, благодаря разработкам НИИ «Сатурн», к 1985 году этот разрыв стал незначительным.



Вся научно-техническая и производственно-технологическая деятельность НИИ «Сатурн» была направлена на решение двух главных задач:

— опережающее, по сравнению с зарубежным уровнем, развитие закрепленного за предприятием научно-технического направления;

— сокращение цикла «наука — производство».

В связи с этим особое внимание Л. Г. Гассанов уделял воспитанию молодых ученых и инженеров. Он не боялся поручать выполнение сложных работ с практически недостижимыми результатами молодым специалистам, при этом в узком кругу иногда говорил: «Они по молодости лет не знают, что получить заданные параметры невозможно, поэтому получают их». Одержимость коллектива «Сатурна» в работе, нестандартный подход к решению поставленных задач породили для характеристики работников сначала иронический, а потом и доброжелательный эпитет «сатурноватые».

По инициативе Л. Г. Гассанова и при полной поддержке руководства Киевского политехнического института (КПИ) была выработана четкая схема подготовки студентов КПИ к работе на предприятии: производственная практика — преддипломная практика — защита дипломного проекта — трудоустройство в НИИ «Сатурн». Особо тесно сотрудничество в научной и учебной работе было налажено с факультетом электроники, деканом которого был профессор, а ныне академик НАН Украины Ю. И. Якименко.

Широта научных взглядов, эрудиция и энтузиазм Л. Г. Гассанова, его внимание к подготовке научных и инженерных кадров принесли свои плоды — по его инициативе и непосредственном участии в НИИ «Сатурн» активно развивались перспективные направления СВЧ-электроники, сформировалось несколько научных школ. Некоторые из них оказали очень серьезное влияние на развитие СВЧ-электроники не только Украины, но и за ее пределами.

Еще до середины 1970-х годов наилучшие характеристики приемных СВЧ-систем достигались только за счет применения сверхмалошумящих параметрических усилителей и казалось, что альтернатива им найдется не скоро. Однако сотрудники НИИ «Сатурн» В. И. Дворников и В. И. Босый, чувствуя абсолютную поддержку Л. Г. Гассанова, настойчиво пропагандировали создание сверхмалошумящих транзисторных СВЧ-усилителей, и в результате в настоящее время о параметрических усилителях молодые инженеры слышат только вскользь и в прошедшем времени. Добиться же такого принципиального переворота удалось только за счет создания в НИИ «Сатурн» собственных сверхмалошумящих полевых транзисторов с барьером Шоттки. Личная заслуга в этом принадлежит

Л. Г. Гассанову, который на всех уровнях — в министерствах, академических институтах и вузах — доказывал необходимость развития арсенид-галлиевой технологии полупроводниковых СВЧ-приборов, которая остается одной из самых прогрессивных и до настоящего времени. Создание в НИИ «Сатурн» такого уникального технологического комплекса с лабораторией электронно-лучевой литографии позволило В. И. Босому не только и далее совершенствовать СВЧ-транзисторы и диоды, но и, уже в условиях независимой Украины, создать современные сверхъяркие диоды энергоэффективных осветительных приборов.

До 1970-х годов в многочастотных приемопередающих СВЧ-системах, например магистральных радиорелейных линиях, применялись громоздкие, габаритные и сложные в изготовлении волноводные устройства разделения и объединения стволов (РОС). И когда усилиями Л. Г. Гассанова и Т. Н. Нарытника вместо волноводных РОС были разработаны и изготовлены малогабаритные устройства того же класса с использованием СВЧ диэлектрических резонаторов, это было революционным достижением. Благодаря этому направлению в радиоэлектронике (получившему название «СВЧ-диэлектроника») габариты приемопередающих СВЧ-систем резко уменьшились, а применение диэлектрических резонаторов в СВЧ-генераторах и гетеродинах позволило не только уменьшить их габариты, но и улучшить параметры.

В связи с относительным сокращением объема работ по криоэлектронным системам появилась возможность начать разработку криомедицинских установок, а потом и других устройств для медицины. В результате практической реализации ряда изделий для использования в медицинской практике авторский коллектив их создателей во главе с академиком А. А. Шалимовым и при участии Ю. Н. Муськина был удостоен Государственной премии СССР.

В НИИ «Сатурн» также были разработаны и частично освоены в производстве изделия и товары народного потребления: дистанционный измеритель скорости автотранспорта, изделия для сельского хозяйства, в том числе биотермостаты для применения при искусственном осеменении крупного рогатого скота.

Изделия НИИ «Сатурн» во многих случаях определяли общий научно-технический уровень важнейших объектов, таких как системы дальней космической связи в проектах «Венера-15», «Венера-16», «Вега», системы спутникового телевидения «Москва», в уникальных радиоастрономических комплексах типа РАТАН-600 и РТ-70, в широком спектре приемных станций спутникового телевидения в глухих заполярных поселках, а также сверхчувствительных прием-

ных радиометрических систем радиоастрономии для исследования Вселенной. Это подтверждало правильность выбранного направления работ и высокий потенциал предприятия.

Работы НИИ «Сатурн» не остались без внимания многих известных ученых страны, представителей силовых структур, партийных и государственных деятелей. В разные годы НИИ «Сатурн» посетили академик АН СССР, лауреат Нобелевской и Ленинской премий А. М. Прохоров, академик АН СССР, президент АН УССР, лауреат Ленинской премии Б. Е. Патон, лауреат Ленинской премии академик Н. Д. Деятков, лауреат Нобелевской премии академик Ж. И. Алферов, академики АН СССР Б. М. Вул, Ю. В. Гуляев, Р. З. Сагдеев (директор ИКИ АН СССР), член-корреспондент АН СССР В. И. Сифоров, академики АН УССР В. П. Шестопалов, Г. С. Писаренко, В. М. Глушков, В. Г. Барьяхтар, маршал войск связи А. И. Белов, генералы Н. П. Емахонов, А. А. Мыльцев и К. И. Кобец, летчик-космонавт СССР Б. В. Волюнов, руководители ряда министерств, НИИ и промышленных предприятий страны.

Под руководством Л. Г. Гассанова и при его поддержке как в НИИ «Сатурн», так и в КПИ получили широкое признание такие ученые, как

доктора наук В. И. Попов, А. И. Семенко, К. С. Сундучков, Б. В. Ткачук, Ю. И. Якименко, кандидаты наук В. И. Босый, Н. Н. Кобак, Ю. Н. Муськин, Т. М. Нарытник, В. М. Чмил (премиер Л. Г. Гассанова на посту руководителя «Сатурна») и многие другие. Всего за период пребывания Л. Г. Гассанова на посту руководителя НИИ «Сатурн» было защищено пять докторских и около пятидесяти кандидатских диссертаций, девять коллективов сотрудников удостоены Государственных премий.

Работы, начатые профессором Л. Г. Гассановым, до сих пор успешно продолжают во многих коллективах. Его ученики развивают такие направления, как теория и разработка маломощных СВЧ-приборов, разработка и производство радиорелейного оборудования, разработка и исследование эффективной системы спутниковой связи, радиоастрономии, радиолокации и медицины, исследование и создание новейших микроволновых телекоммуникационных систем на принципах микроомной электроники и диэлектроники с использованием достижений нанотехнологии.

Заслуги Льва Гассановича Гассанова неоценимы и всегда останутся в памяти его учеников и коллег.

Е. М. ГЛУШЕЧЕНКО, Т. М. НАРИТНИК

Україна, м. Київ, НВП «Сатурн»

E-mail: gen-nto@ukr.net

РОЛЬ ОСОБИСТОСТІ У НАУКОВОМУ ПРОГРЕСІ (ДО 80-РІЧЧЯ ВІД ДНЯ НАРОДЖЕННЯ Л. Г. ГАССАНОВА)

Стаття присвячена Льву Гассановичу Гассанову, який з 1974 до 1991 року очолював НДІ «Сатурн». Непересічна особистість, талановитий керівник, організатор і вчений, автор багатьох монографій, наукових праць і винаходів, він заснував вітчизняну школу зі створення широкого класу приладів, пристроїв і систем мікропотужної електроніки.

Ключові слова: Л. С. Гассанов, НДІ «Сатурн», СВЧ-електроніка, мікропотужна електроніка, діелектроніка.

DOI: 10.15222/TKEA2016.2-3.53
UDC 621.7.05

Е. М. GLUSHECHENKO, Т. N. NARYTNIK

Ukraine, Kyiv, JSS «Saturn»

E-mail: gen-nto@ukr.net

ROLE OF PERSONALITY IN SCIENTIFIC ADVANCEMENT (Dedicated to the eightieth anniversary of the birth of Lev G. Gassanov)

The article is dedicated to Lev G. Gassanov who between 1974 and 1991 headed the "Saturn" Research Institute. Lev Gassanov was an outstanding personality, a talented leader, organizer and scholar, author of many books, scientific works and inventions, he founded a national school for the creation of a broad range of micropower electronics devices and systems.

Keywords: L.S. Gassanov, RI «Saturn», microwave electronics, micro-power electronics, dielectronics.

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

Аверочкин Владимир Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет

Болтовец Николай Силович, канд. физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе, НИИ «Орион», г. Киев

Должиков Владимир Васильевич, докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Ефименко Анатолий Афанасьевич, докт. техн. наук, зав. кафедрой, Одесский национальный политехнический университет

Залесский Валерий Борисович, канд. техн. наук, зав. лабораторией, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», г. Минск

Лазько Л В, канд. техн. наук, доцент, Национальный университет «Львовская политехника»

Лузин Сергей Юрьевич, докт. техн. наук, технический директор ООО «Эремекс», г. Санкт-Петербург

Мелешкевич Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет

Обухов Илья Андреевич, докт. физ.-мат. наук, заместитель генерального директора по науке и техническому развитию, НПП «Системные ресурсы», г. Москва

Рюхтин Вячеслав Васильевич, канд. техн. наук, зам. председателя правления по научной работе ЦКБ «Ритм», г. Черновцы

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

Филинюк Николай Антонович, докт. техн. наук, зав. кафедрой, Винницкий национальный технический университет

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 (подробнее см. на сайте журнала).

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» формируется в порядке их упоминания в тексте. Образец оформления списка см. на сайте.

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.

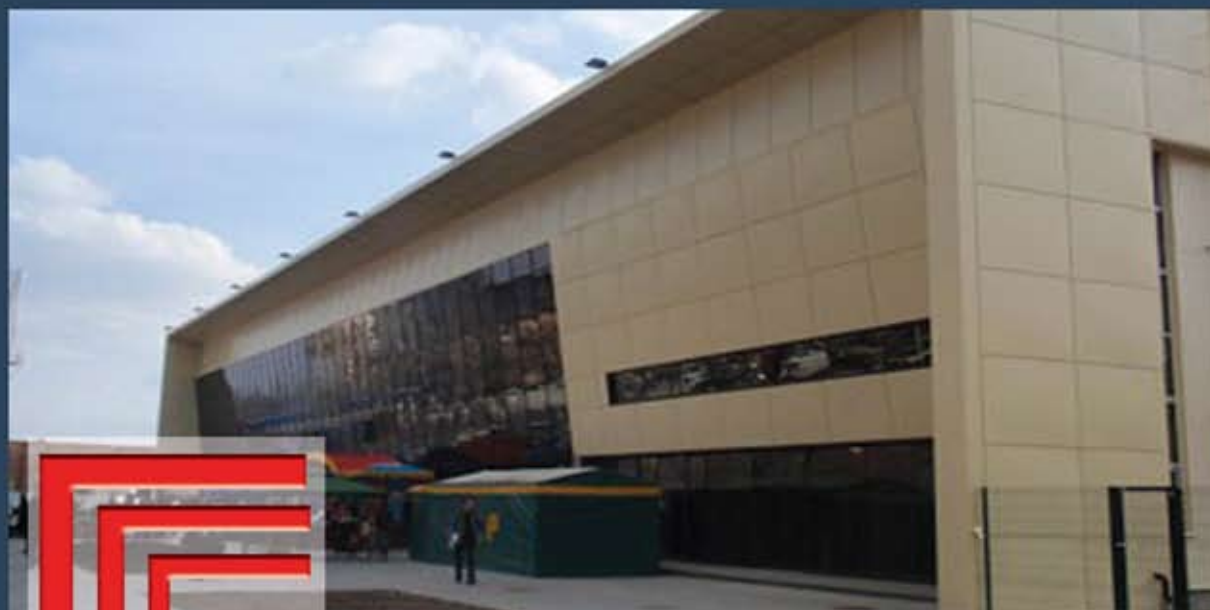
12. При наборе текста статьи допускается использование программ типа MathType только в тех случаях, когда Word бессилен, например при наборе специальных знаков над буквенными обозначениями, подкоренных выражений, пределов интегрирования, суммирования и т. п.

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 авторах (см. на сайте), направляются по e-mail <kea@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 2016

12-я специализированная выставка
энергоэффективных решений
10–12 сентября 2016

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



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

*Номер готовили
Баку, Винница, Киев, Львов, Минск,
Москва, Одесса, Санкт-Петербург,
Харьков, Черновцы*



Пишите
Подписывайтесь
Читайте