

# ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



К статье  
Всегда на передовых рубежах  
СВЧ-электроники  
(к 50-летию НИИ «Сатурн»)



# 1 2018

ЯНВАРЬ — ФЕВРАЛЬ

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

ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

*К.т.н. А. Ф. Бондаренко*

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

Чл.-корр. НАНУ, д.ф.-м.н. А. Е. Беляев (г. Киев, Украина)  
Д.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов, Украина)  
Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса, Украина)  
К.т.н. В. М. Чмиль В. (г. Киев, Украина)  
Е. А. Тихонова (г. Одесса, Украина)

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

*Д.т.н. С. Г. Антощук* (г. Одесса, Украина)  
*Д.т.н. А. П. Бондарев* (г. Львов, Украина)  
*Prof. I. Vajda* (Budapest, Hungary)  
*Prof. D. Vinnikov* (Tallinn, Estonia)  
*Prof. I. Galkin* (Riga, Latvia)  
*К.т.н. Э. Н. Глушеченко* (г. Киев, Украина),  
зам. главного редактора  
*К.т.н. Г. Г. Горох* (г. Минск, Республика Беларусь)  
*Prof. K. Dhoska* (Tirana, Albania)  
*Д.ф.-м.н. В. В. Должиков* (г. Харьков, Украина)  
*Д.т.н. А. А. Дружинин* (г. Львов, Украина)  
*Д.т.н. А. А. Ефименко* (г. Одесса, Украина),  
зам. главного редактора  
*Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк* (г. Киев, Украина)  
*Д.т.н. С. И. Круковский* (г. Львов, Украина)  
*Д.т.н. С. Ю. Лузин* (г. С.-Петербург, Российская  
Федерация)  
*Чл.-корр. НАНУ, д.ф.-м.н. В. С. Лысенко* (г. Киев,  
Украина)

*Prof. J. Martins* (Caparica, Portugal)  
*Д.т.н. И. Ш. Невлюгов* (г. Харьков, Украина)  
*Dr.Sc. D. Nika* (Chisinau, Moldova)  
*Д.т.н. Ю. Е. Николаенко* (г. Киев, Украина)  
*Prof. V. Pires* (Setúbal, Portugal)  
*Д.ф.-м.н. С. В. Плаксин* (г. Днепропетровск,  
Украина)  
*К.т.н. Проконец В. М.* (г. Киев, Украина)  
*Prof. E. Romero-Cadaval* (Badajoz, Spain)  
*К.ф.-м.н. А. В. Рыбка* (г. Харьков, Украина)  
*К.т.н. П. С. Сафронов* (г. Одесса, Украина),  
отв. секретарь редколлегии  
*Д.т.н. В. Н. Сигорец* (г. Киев, Украина)  
*Д.т.н. В. С. Ситников* (г. Одесса, Украина)  
*Dr.Sc. Z. Stević* (Belgrade, Serbia)  
*Д.х.н. В. Н. Томашик* (г. Киев, Украина)  
*К.т.н. В. Е. Трофимов* (г. Одесса, Украина)

---

**Подписка на журнал**

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

В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.

**Контактная информация**

Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17;  
tkea@optima.com.ua, www.tkea.com.ua,  
+38 (048)728-18-50, 728-49-46.

**Редакция**

*Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, П. С. Сафронов,  
А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова, Е. И. Корецкая.*

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

Реферируется  
в УРЖ «Джерело»  
(г. Киев)

Журнал 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,  
в базу данных DOAJ,  
в Google Scholar

Номер выпущен при поддержке  
ОНПУ (г. Одесса),  
НПП «Сатурн» (г. Киев),  
НПП «Карат» (г. Львов)

Одобрено к печати  
Ученым советом ОНПУ  
(Протокол № 6 от 27.02 2018 г.)  
Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

#### УЧРЕДИТЕЛИ

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

Свидетельство о регистрации  
№ КВ 21788-11688ПР  
от 21.12.2015 г

## СОДЕРЖАНИЕ

### Современные электронные технологии

Варианты технологии встраивания низкопрофильной электроники в печатные платы. *А. А. Ефименко, В. А. Рябов* (на английском)

3

### Функциональная микро- и нанoeлектроника

СБИС для микроэлектронного координатно-чувствительного детектора нового поколения с расширенным полем анализа для масс-спектрометрии. *В. П. Сидоренко, А. И. Радкевич, Ю. В. Прокофьев, Ю. В. Таякин, Т. М. Вирозуб*

13

### Технологические процессы и оборудование

Особенности конструкции и технологии сборки микроэлектронных координатно-чувствительных детекторов. *В. П. Сидоренко, В. Д. Жора, А. И. Радкевич, В. П. Грунянская, Ю. В. Прокофьев, Ю. В. Таякин, Т. М. Вирозуб*

21

### Системы передачи и обработки сигналов

Быстродействующий алгоритм восстановления несущей частоты и кадровой синхронизации в модемах с QPSK-модуляцией. *А. В. Садченко, О. А. Кушниренко, Е. К. Кошелев, В. И. Бондар*

28

### Материалы электроники

Влияние содержания серы на сцинтилляционные свойства смешанных кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$ . *О. Г. Трубаева, М. А. Чайка, О. В. Зеленская, А. И. Лалаянц, С. Н. Галкин*

36

### Энергетическая электроника

Применение самовосстанавливающихся элементов для электрической защиты солнечных батарей. *А. С. Тонкошкур, А. В. Иванченко, Л. В. Накашидзе, С. В. Мазурик*

43

### К истории науки и техники

Всегда на передовых рубежах СВЧ-электроники (к 50-летию НИИ «Сатурн»). *Э. Н. Глушеченко, В. М. Чмиль*

50

### Указатель статей, опубликованных в 2017 г.

54

### Список рецензентов номера

56

## ЗМІСТ

**Сучасні електронні технології**

Варіанти технології вбудовування низькопрофільних електронних компонентів у друковані плати. *А. А. Єфіменко, В. О. Рябов* (3)

**Функціональна мікро- і наноелектроніка**

НВІС для мікроелектронного координатно-чутливого детектора нового покоління з розширеним полем аналізу для мас-спектрометрії. *В. П. Сидоренко, О. І. Радкевич, Ю. В. Прокоф'єв, Ю. В. Таякін, Т. М. Віроzub* (13)

**Технологічні процеси та обладнання**

Особливості конструкції та технології складання мікроелектронних координатно-чутливих детекторів. *В. П. Сидоренко, В. Д. Жора, О. І. Радкевич, В. П. Грунянська, Ю. В. Прокоф'єв, Ю. В. Таякін, Т. М. Віроzub* (21)

**Системи передачі та обробки сигналів**

Швидкодіючий алгоритм відновлення несучої частоти і кадрової синхронізації у модемах з QPSK-модуляцією. *А. В. Садченко, О. А. Кушніренко, Є. К. Кошелев, В. І. Бондар* (28)

**Матеріали електроніки**

Вплив вмісту сірки на сцинтиляційні властивості змішаних кристалів  $ZnS_xSe_{1-x}$ . *О. Г. Трубаєва, М. А. Чайка, О. В. Зеленська, О. І. Лалаянц, С. М. Галкін* (36)

**Енергетична електроніка**

Використання самовідновлюваних елементів для електричного захисту сонячних батарей. *О. С. Тонкошкур, О. В. Іванченко, Л. В. Накашидзе, С. В. Мазурик* (43)

**До історії науки і техніки**

Завжди на передових позиціях СВЧ-електроніки (до 50-річчя НДІ «Сатурн»). *Е. М. Глушеченко, В. М. Чміль* (50)

## CONTENTS

**Modern electronic technologies**

Technology options for embedding low-profile electronic components in printed circuit boards. *A. A. Efimenko, B. A. Ryabov* (3)

**Functional micro- and nanoelectronics**

VLSI for a new generation of microelectronic coordinate-sensitive detectors with an extended field of analysis for use in mass spectrometry. *V. P. Sidorenko, O. I. Radkevich, Yu. V. Prokofiev, Yu. V. Tayakin, T. M. Virozub* (13)

**Production technology and equipment**

Assembly technology and design features of microelectronic coordinate-sensitive detectors. *V. P. Sidorenko, V. D. Zhora, O. I. Radkevich, V. P. Grunianska, Yu. V. Prokofiev, Yu. V. Tayakin, T. M. Virozub* (21)

**Signals transfer and processing systems**

*High-speed algorithm for carrier frequency recovery and frame synchronization in QPSK-modulated modems.* *A. V. Sadchenko, O. A. Kushnirenko, E. K. Koshelev, V. I. Bondar* (28)

**Materials of electronics**

Effect of sulfur on the scintillation properties of mixed  $ZnS_xSe_{1-x}$  crystals. *O. G. Trubaieva, M. A. Chaika, O. V. Zelenskaya, A.I. Lalayants, S. N. Galkin* (36)

**Power electronics**

Application of resettable elements for electrical protection of solar batteries. *A. S. Tonkoshkur, A. V. Ivanchenko, L. V. Nakashydz, S. V. Mazurik* (43)

**On the history of science and engineering**

Always at the forefront of microwave electronics (on the occasion of the 50<sup>th</sup> anniversary of the "Saturn" Research Institute). *E. N. Glushechenko, V. M. Chmil* (50)

*Dr. Sc. A. A. EFIMENKO, B. A. RYABOV*

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

## TECHNOLOGY OPTIONS FOR EMBEDDING LOW-PROFILE ELECTRONIC COMPONENTS IN PRINTED CIRCUIT BOARDS

*In order to improve the overall characteristics of printed circuit boards, two technologies for the formation of multilayer printed circuit boards have been developed – with the embedding of low-profile electronic components in a layer of fiberglass and a monolithic layer of polyimide, provided that they are assembled without soldering and welding. The indicators for quantitative evaluation of printed circuit boards with embedded electronic components and their comparison both among themselves and with printed circuit boards without embedded electronic components are proposed.*

*Keywords: embedded electronic components, printed circuit boards, low-profile electronic components, connecting layers, polyimide varnish.*

Size and weight reducing of modern electronic devices, while increasing their functionality, performance and reliability is possible through the use of new electronic technologies and to a large extent is provided by the improvement of electronic components (EC), first of all, of integrated circuits and their packaging technologies. The increase in the number of leads and a decrease in their pitch, more frequent use of matrix arrangement of leads under the package, the integration of several devices on the chip and several components in one package, impose specific requirements for printed circuit boards (PCB). To increase the density of joints, besides the use of such means as reducing the size of the elements of the printed pattern and increasing the number of layers, interlayer and contact connections, it is necessary to find other solutions that allow better adaptation of the development of electronic components to the design of electrical connections on PCB.

Such solutions should make the design process more flexible and improve the PCB characteristics, primarily electrical and electromagnetic compatibility.

One of these perspective design and technological solutions is PCB with embedded ECs, for which it is possible to use the term «hybrid integrated circuit board» [1–5].

For the last 5–6 years, this direction of the development of printed circuits in electronic equipment has been fully formed and continues to be improved, besides it is regarded as one of the directions that determine the development of radio electronics [1].

Embedded electronic components are components inserted inside a usually multilayer PCB. They can be of two types: formed – these are ECs that are created during the manufacturing of PCBs on its internal layers (can only be passive) and inserted – these are independently produced discrete components that are placed on the inner layer of a PCB during its manufacturing or assembly (may be both passive and active, have small dimensions, first of all thickness). More information about the design and technological solutions for creating PCBs with embedded ECs can be given in **Fig. 1** classification of PCBs [6].

Due to the fact that today the PCBs with inserted electronic components have great potential and, thus, greater interest in use, we consider the technological processes of embedding discrete components.

There are a number of design and technological solutions for the creation of printed circuit boards with embedded ECs. All of them have their own peculiarities, advantages and disadvantages, areas of application. Most of them contain SMD components for embedding that are installed on the inner layers of fiberglass and fixed by adhesive. In order to form electrical connections, operations typical for surface mounting are used. The fiberglass layers with embedded components are then pressed together with connecting layers of semiproduct material prepreg. Thus, the ECs are placed in the connecting layers.

Such a constructive and technological approach to the implementation of PCBs has some disadvantages, primarily due to the fact that the elec-

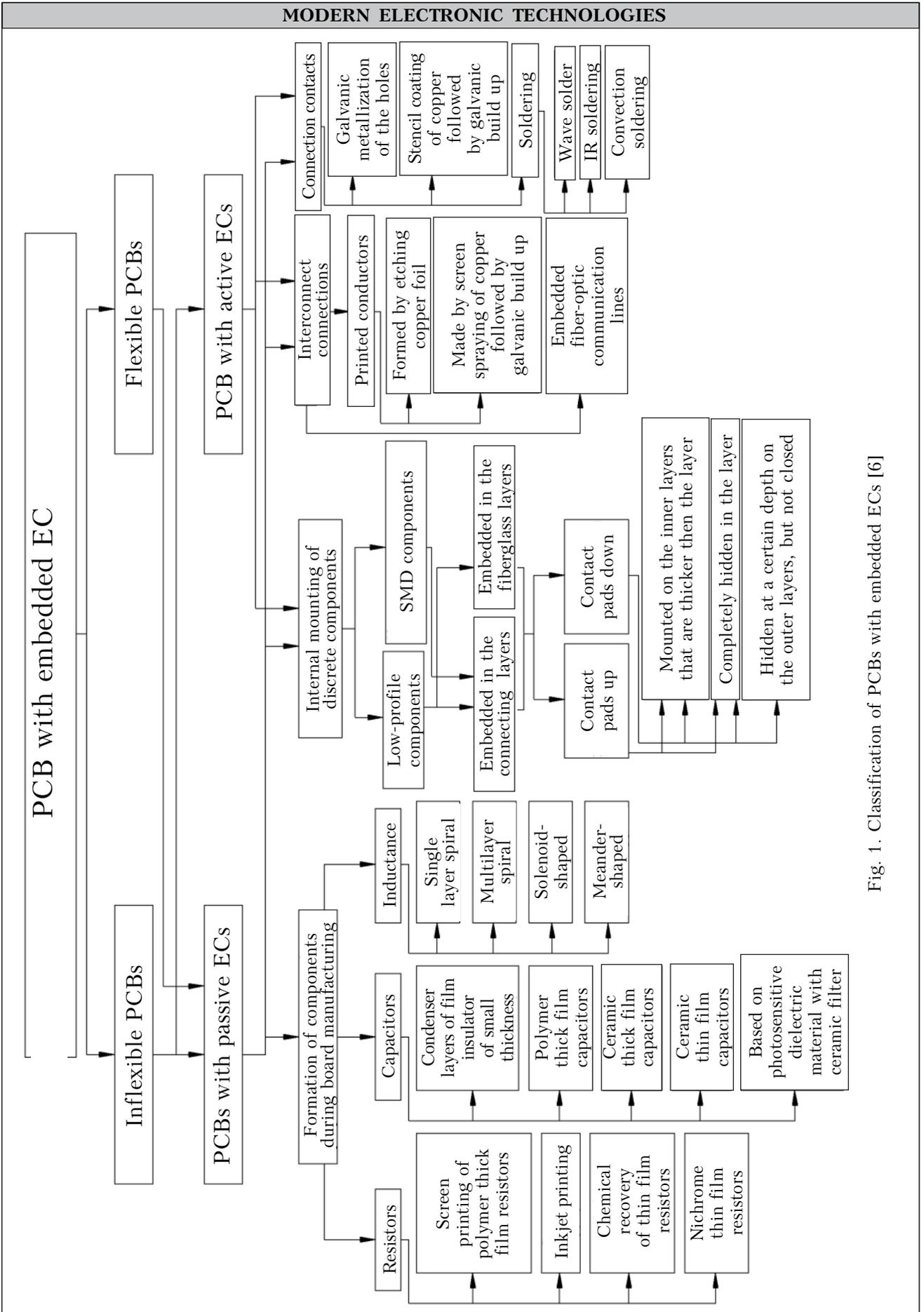


Fig. 1. Classification of PCBs with embedded ECs [6]

tronic components used are relatively thick, and also the need to carefully select the technological parameters of the pressing process in order to avoid damage to the installed ECs during its conducting [9]. It is possible to reduce the thickness of a multilayer PCB by using low-profile (LP) ECs [10]. However, there are certain problems associated with the fact that since the contact pads of such ECs are made by spraying and have copper surfaces [10], they can not be mounted by soldering. The inability to use conventional soldering operations of SMD components determines the need to create new technologies for mounting LPECs.

The purpose of this study was to develop of technology for the creation of printed circuit boards with improved overall dimensions with embedded electronic components and their installation without soldering and welding.

Within the framework of the solution of the problem, the authors developed two versions of the PCB manufacturing technology: embedding low-profile ECs into the fiberglass layer and embedding low-profile ECs into the monolithic polyimide layer. Furthermore, coefficients are proposed that allow evaluating the efficiency of using embedded ECs.

**The technology of embedding ECs into a fiberglass layer**

The difference between this method and the known ones [5–9 ] is that the components occupy a volume directly in a layer of fiberglass, and not in the connecting layer.

Besides, instead of the usual SMD components, special LPECs are used which have the same electric parameters but lower height (Fig. 2).

The technology of the formation of multilayer printed circuit boards with embedded LPECs is considered on the example of implementation of

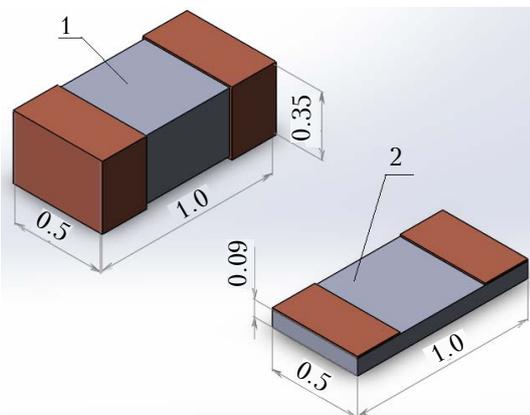


Fig. 2. Overall dimensions of SMD (1) and low-profile resistor (2) of type 0402

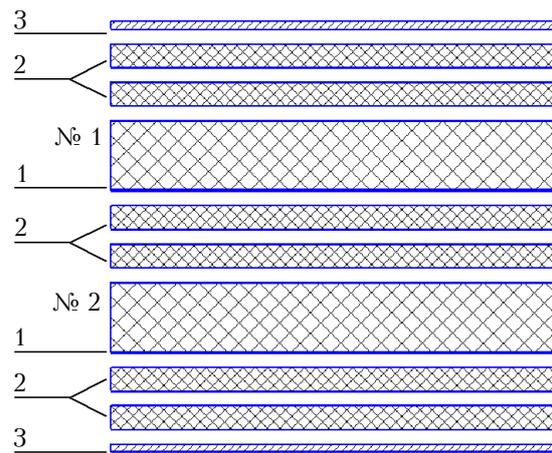


Fig. 3. The initial structure of a multilayer PCB: 1 – cores №1 and №2 (foil-coated fiberglass); 2 – connecting layers (prepreg); 3 – copper foil

a 6-layer printed circuit board (Fig. 3) with such parameters [11]:

- cores (inner layers) 1 made of a double-sided fiberglass with a thickness of 300 μm with a 5 μm thick foil on both sides (material FR4 0.3/5/5);
- connecting layers 2 of a type 2116 prepreg film with a thickness of 105 μm. Allowable number of connecting layers in the multilayer printed circuit boards is at least 2 and not more than 4;
- outer layers of copper foil with a thickness of 35 μm (may vary).

It should be noted, that the possibility of using a single bonding layer depends on the nature of conductor pattern of the printed circuit board and the thickness of adjacent copper layers. The thicker is the copper layer and the greater is the density of the conductor pattern, the more difficult it is to fill the space between the conductors with resin, and the quality of the filling affects the reliability of the board. This is why, for example, for a 35 μm thick copper foil layer, one can use only a type 7628 connecting layer with a thickness of 180 μm.

Total thickness of the assembled board, taking into account shrinkage of the connecting layers, is about 1.3 mm.

In this example, we embed two type 0402 LP resistors and a type 0402 LP ceramic capacitor on core №1, a type 1206 LP ceramic capacitor on core №2, and a type 0402 SMD resistor on each of the outer layers. The ratio of the dimensions of these components is shown in Fig. 4.

The first technological operation in the PCB manufacturing process is the preparation of cores for the ECs installation, which involves the creation of through holes for installing components

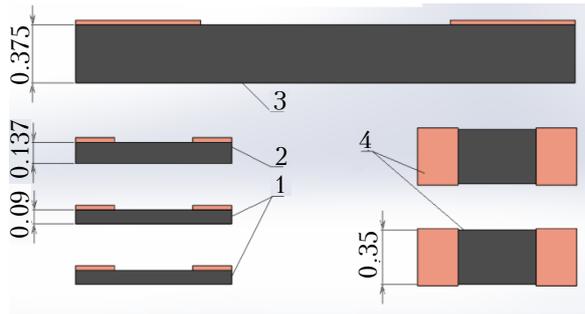


Fig. 4. The ratio of the dimensions of ECs:  
 1 – type 0402 LP resistors; 2 – type 0402 LP ceramic capacitor; 3 – type 1206 LP ceramic capacitor; 4 – type 0402 SMD resistors

in them and through holes for further formation of interlayer electrical connections. The holes for the ECs installation can be of two types: round and rectangular. Round holes can be made by means of mechanical drilling and laser cutting. Rectangular holes can be cut with a laser. It should be noted, that to maintain the integrity of the structure of fiberglass, it is of course best to use laser cutting along the contour. According to this technology, for type 0402 components (resistors and capacitors) we cut out round holes, and a rectangular hole is made for the type 1206 capacitor (Fig. 5). The cross section of a multilayer PCB with holes for the EC is shown in Fig. 6.

The next technological operation is placing and fixing the ECs in their corresponding holes (Fig. 7). To fix the EC, it is necessary to put the correspond-

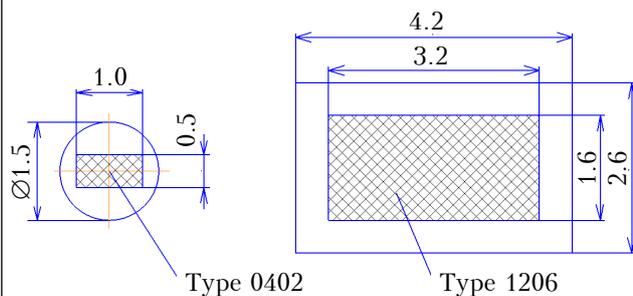


Fig. 5. ECs in their installation holes

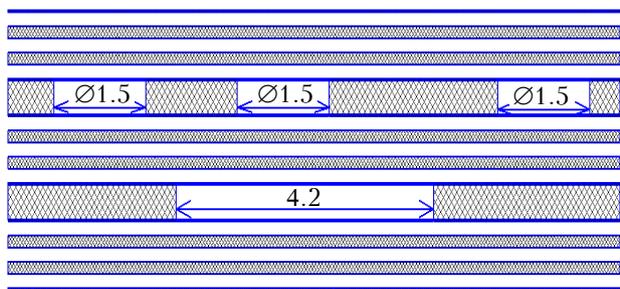


Fig. 6. Cross section of a multilayer PCB with holes for electronic components in internal layers

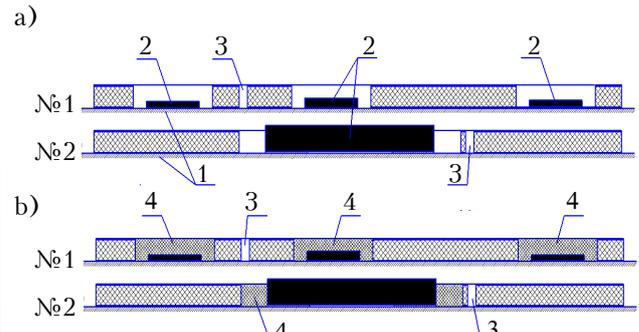


Fig. 7. Mounting (a) and fixing (b) of LPECs on cores №1 and №2:

1 – flat surface; 2 – ECs; 3 – through transition hole; 4 – polyimide varnish

ing core on a smooth flat surface, then to insert the component into the corresponding hole in such a way that the contact pads are oriented downwards and touch the supporting surface. Contact pads must be precisely oriented according to positions, determined by the layout of the ECs on the PCB. After that, it is necessary to fill the void with the ECs in such a way that the polyimide varnish fills the entire thickness of the inner layer. For filling holes with installed ECs, it is offered to use polyimide varnish or epoxy resin.

After polymerization of the varnish, it is necessary to electrically connect the EC contact pads with the core copper foil layer. This is realized by means of screen printing deposition of a copper layer up to 3 μm thick on the corresponding sites (Fig. 8). At the same time, copper is sprayed into the through holes for the interlayer connections. Note, that in cases of high density of the conductor pattern on the inner layers, it is possible to perform a screen deposition of copper on the sites that were formed during the polymerization of the varnish.

Then a number of normal operations are performed:

- photoresist application;
- projecting the PCB pattern through the photo mask, which should be positive, that is, the conductor pattern should be opaque, so that after the photoresist is developed, it remains on the blank spaces of the board;
- developing the photoresist, washing off unexposed areas and washing the PCB;
- galvanic buildup of an at least 25 μm thick copper layer on a conductor pattern, including the transition holes;
- deposition of metal resist layer (tin-lead alloy);
- photoresist removal;
- etching of copper in blank spaces and washing the board.

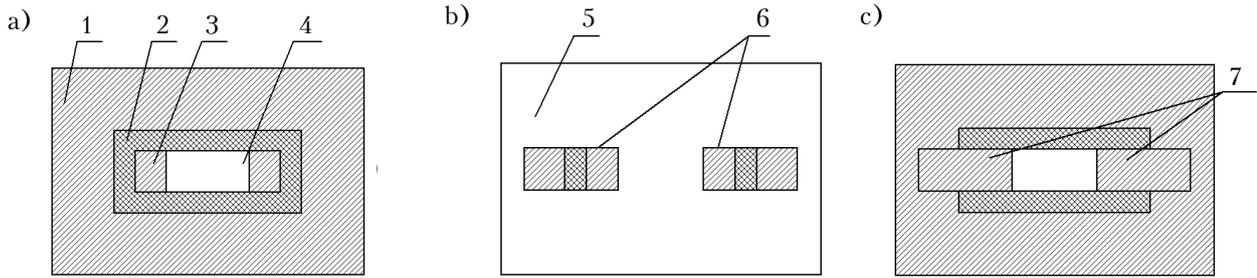


Fig. 8. Stages of screen copper sputtering to create contact connections:

*a* – preparation of PCB for sputtering; *b* – PCB with a screen; *c* – PCB with the formed contact connections;  
 1 – copper foil ; 2 – polyimide film; 3 – LPEC contact pads; 4 – LPEC; 5 – screen; 6 – screen holes integrating the contact pads of EC with a layer of copper foil; 7 – sputtered copper layer

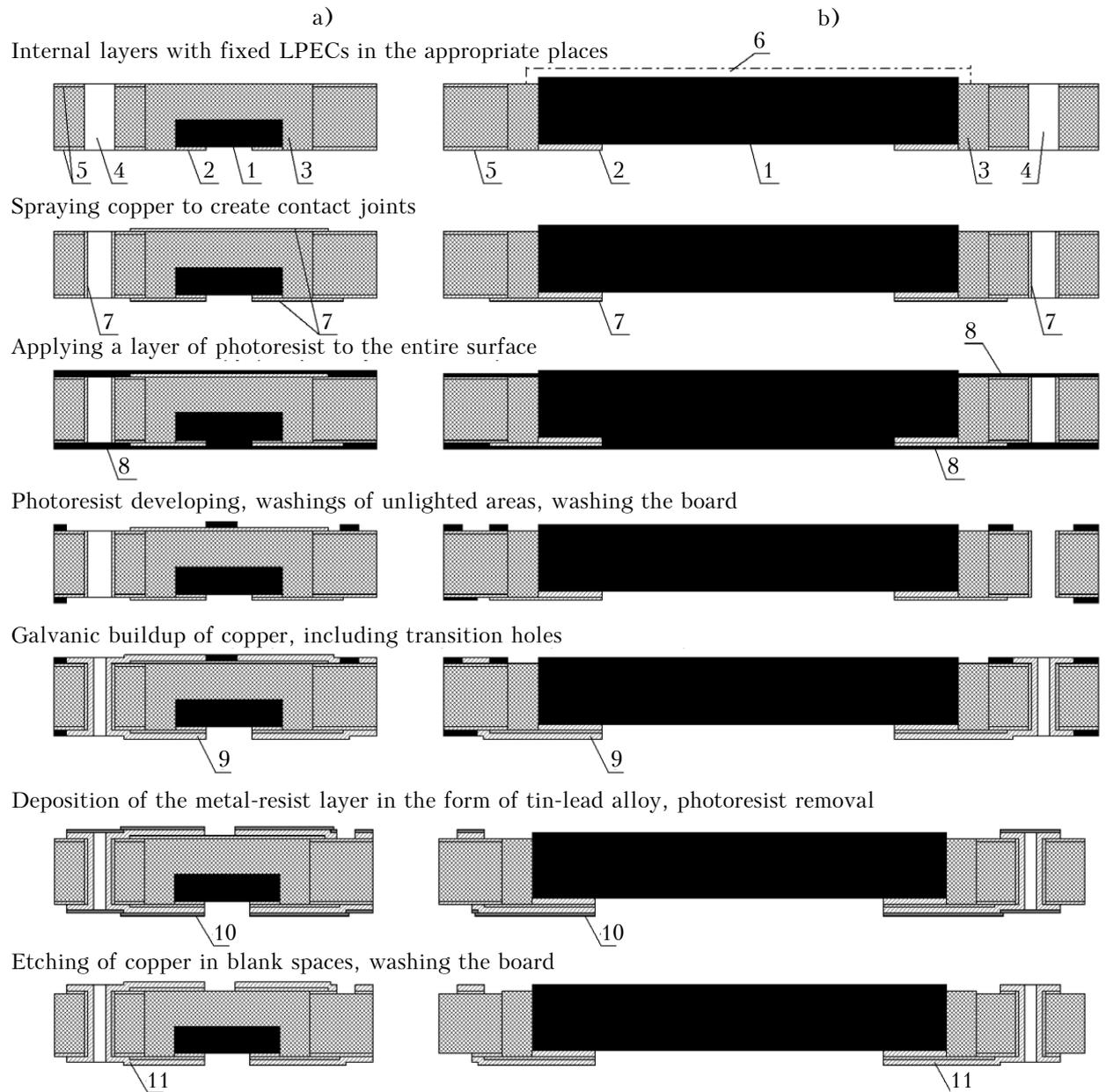


Fig. 9. Scheme of the process of conductor pattern formation on cores №1 (*a*) and №2 (*b*):

1 – LPEC; 2 – contact pads LP EC; 3 – polyimide film; 4 – through holes; 5 – copper foil; 6 – restricted area; 7 – deposited copper layer; 8 – photoresist layer; 9 – electroplated copper layer; 10 – metal resistor layer; 11 – conductor pattern

The conductive pattern is formed on both sides of the core as two layers interconnected by means of metallized holes.

It is more difficult to create a conductor pattern on the side of the PCB opposite the contact pads of the ECs. When the components protrude beyond the level of the filled varnish, a forbidden zone is formed in which it is impossible to create a conductor pattern. In cases, when the EC packages are sensitive to the corrosive environment formed during the manufacturing process, they need to be isolated.

**Fig. 9** presents a diagram of the above described technological process of combining contact pads of low-profile ECs with core copper layers and creating such a conductor pattern where one EC is fixed in each inner layer: a type 0402 capacitor in core №1; type 1206 capacitor in core №2.

The prepared internal PCBs (cores) are pressed to each other and to the outer foil layers with interconnecting layers between them (Fig. 3). When pressed, the layers are heated in order to facilitate the filling of all internal cavities with the connecting layer. Pressing regimes do not differ from those used in the process of pressing multilayer PCBs manufactured, for example, by through-hole metallization. As a result of pressing, printed circuit boards shown in **Fig. 10** are obtained.

It should be noted that the embedded low-profile ECs are limited in thickness — in case some part of the EC protrudes over the core, its

height should be less than the thickness of the connecting layer, taking into account its shrinkage during pressing. This limitation is due to the limited thickness of the connecting layers. The thickest connecting layer is the type 7628 prepreg of “Shengyi” [10, 11], its thickness is 0,185 mm before pressing and 0,180 mm after pressing. Also, the more commonly used cores have thickness of 0,300–0,450 mm, so the embedded components can have a thickness of not more than 0,810 mm, but to reduce the mechanical load during pressing, it is not advisable to use ECs with a thickness close to the boundary values.

In our example, the thickness of the largest selected EC is 0,375 mm, the thickness of the core with a two-sided conductor pattern is about 0,350 mm and the thickness of the connecting layers after pressing is 0,100 mm. Thus, after the pressing of a multilayer PCB, the minimum thickness of the connecting layer between the inner layers should be about 0,150 mm, which satisfies the indicated restriction.

The next technological operations are the drilling of through holes and their subsequent metallization (**Fig. 11**).

To create a finished multi-layer PCB, it is necessary to form a conductor pattern on the outer layers of copper foil, which is done using standard operations.

Installation of the SMD and possibly other ECs is also performed using standard technologies. A fragment of the electronic module with

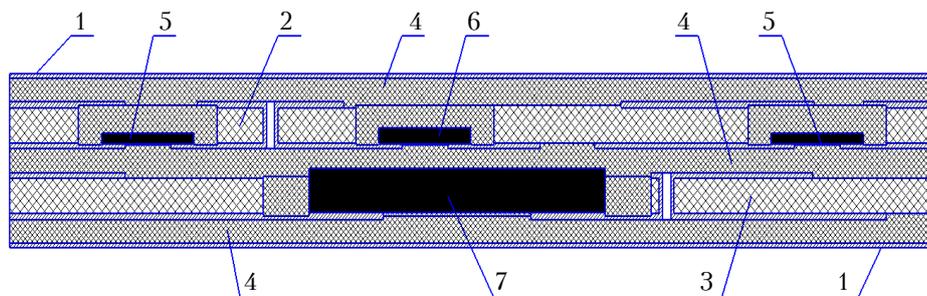


Fig. 10. The result of pressing all layers of the multilayer PCB:

1 – outer copper foil; 2 – inner layer №1 with type 0402 embedded resistors (pos. 5) and a type 0402 capacitor (pos. 6); 3 – inner layer №2 with a type 1206 embedded capacitor (pos. 7); 4 – connecting layers

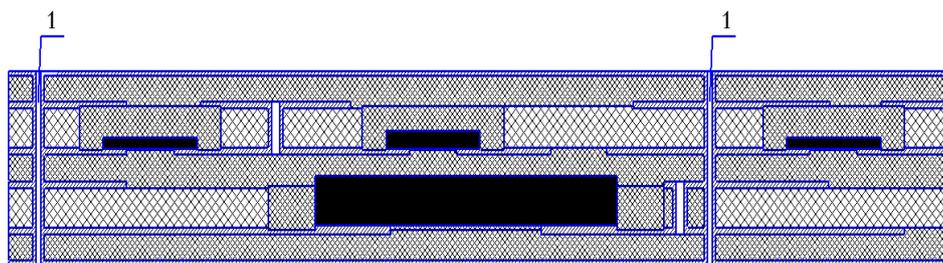


Fig. 11. The formation of through holes 1 with their subsequent metallization

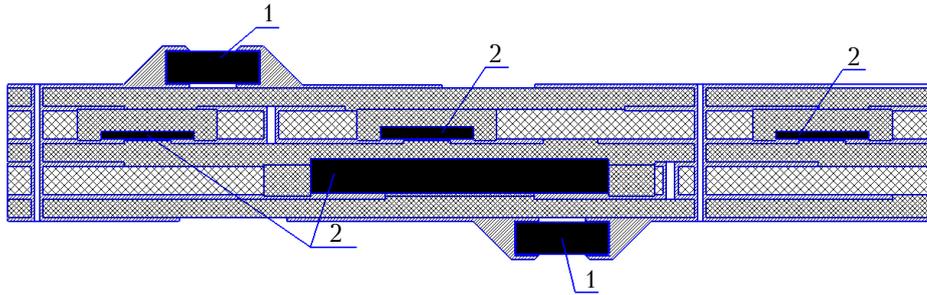


Fig. 12. Electronic module on a multilayer PCB with surface mounted components (1) and with embedded low-profile ECs (2)

external ECs for surface mounting on a multilayer PCB and with embedded ECs is shown in Fig. 12.

Thus, the thickness of the considered multilayer PCB with embedded ECs is about 1.5 mm, that corresponds to the thickness of the PCB, more often used in electronic equipment design practice. The described technological process allows embedding components of larger dimensions than those considered in the example.

Thus we can conclude that this technology of embedding elements can compete with the already known technologies, in which the components are embedded into the connecting layer, and not into the inner layers of fiberglass.

**The technology of embedding ECs in a monolithic polyimide layer**

As a result of the embedding ECs into the PCB according to this technology, an inner layer with embedded ECs is a monolithic structure that is formed by filling the form with installed LPECs by polyimide varnish, followed by its polymerization and the formation of a conductor pattern on this film. The sequence of operations for implementing such a solution is shown in Fig. 13.

Here we give some explanations to technology operations given in Fig. 10.

– The low-profile ECs are installed in a special form, the size of which is determined by the size of the PCB that is created. Contact pads of the components should be oriented downward and fixed in the proper places.

– Polyimide varnish can be poured into the mold to a level when some components will be completely filled and some will protrude, or to such level when all components are completely varnished. In the first case, on the side of the board opposite the EC pads, a forbidden zone is formed, where it is impossible to create a conductor pattern.

– The 3 μm thick copper layer is formed using screen deposition, and electrical connections of the EC contact pads with a copper layer are formed. At the same time, copper is sprayed into transition holes to form the interlayer connections.

Galvanic buildup of a conductor pattern is carried out until a copper layer with a thickness of at least 25 μm is obtained.

With such monolithic polyamide layers with embedded components and conductor pattern, it is possible to form a multilayer PCB. Such boards are based on polyimide and are thus characterized by a certain flexibility. For those cases where some rigidity of the board is required, one or more layers of glass fiber laminate can be added to the structure of the multilayer PCB.

**Indicators for quantitative evaluation of PCB**

To give quantitative evaluation of the design and technological solutions of a PCB and assemblies with embedded ECs the authors propose several indicators that can be used for comparison of the PCBs with embedded ECs to each other, and to the PCBs without the embedded ECs.

– Coefficient of use of embedded ECs

$$K_{USE} = N_{EEC} / N,$$

where  $N_{EEC}$  is the number of embedded ECs;

$N$  is the total number of ECs on a PCB.

– Coefficient of use of embedded components for the area

$$K_{USES} = \sum_{i=1}^{N_{EEC}} S_{EECi} / \sum_{i=1}^N S_i,$$

where  $S_{EECi}$  is the installation area of the  $i^{th}$  embedded component;

$S_{EECi}$  is the installation area of any  $i^{th}$  EC.

The coefficient of use ( $K_{USES}$ ) can be used for more accurate estimation of the degree of use of the embedded EC in comparison with the coefficient  $K_{USE}$ .

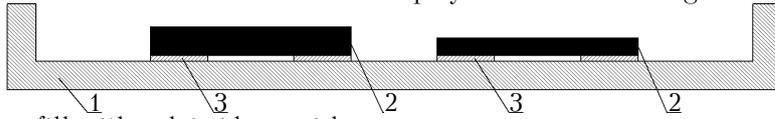
– The efficiency factor of the embedded EC use for the area of the PCB:

$$K_{EFS} = S_{PCB} / S_{PCB EEC},$$

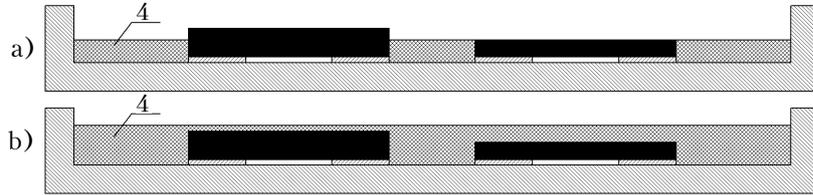
where  $S_{PCB}$  is the area of the PCB without the embedded ECs;

$S_{PCB EEC}$  is the area the same PCB with the embedded ECs.

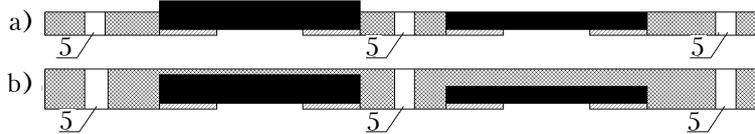
Installation of LPECs in the form for polyimide varnish filling



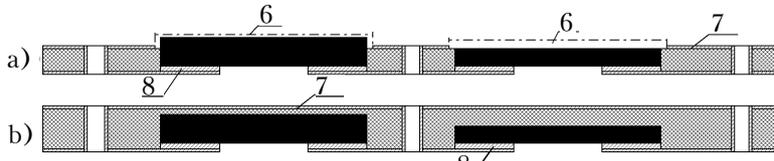
Form fill with polyimide varnish



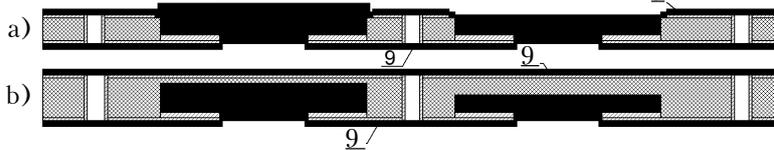
Drilling through transition holes



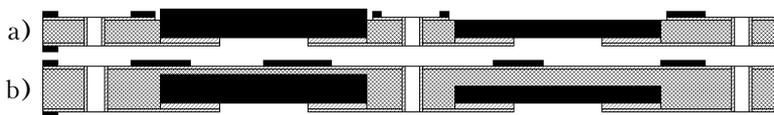
Screened deposition of a solid copper layer, except for forbidden zones



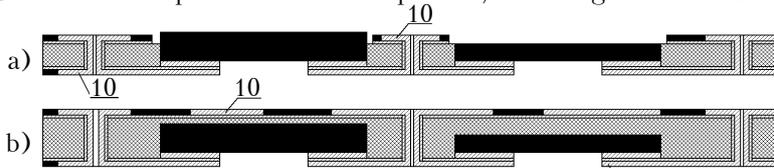
Application of the photoresist layer on the whole surface



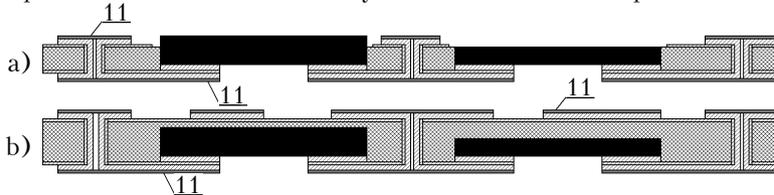
Projecting a PCB pattern through a photomask, developing a photoresist, washing the board



Galvanic buildup of the conductor pattern, including in the transition hole



Deposition of the metal resist layer and removal of the photoresis



Eching copper from blank spaces, washing the board

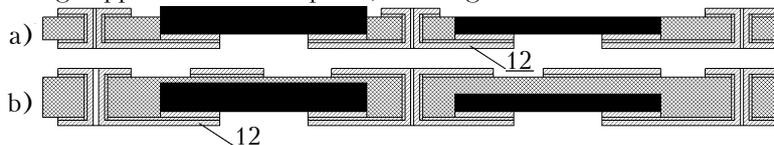


Fig. 13. The technology of creating monolithic polyimide layer with embedded low-profile ECs not completely varnished (a) and completely varnished (b):

1 – form for filling; 2 – low-profile ECs; 3 – ECs contact pads; 4 – polyimide; 5 – through holes; 6 – restricted area; 7 – copper deposited layer; 8 – contact pads connected with a copper layer; 9 – photoresist; 10 – galvanically built up copper layer; 11 – metal resist; 12 – conductor pattern

– The efficiency factor of the embedded ECs use for the height of the PCB:

$$K_{Efh} = h_{PCB} / h_{PCB\ EES},$$

where  $h_{PCB}$  is the height of the PCB without embedded ECs;

$h_{PCB\ ECC}$  is the height of the PCB with embedded ECs.

– Length reducing factor for the connections on the printed circuit board:

$$K_L = L / L_{EES},$$

where  $L_{PCB}$  is the total length of the connections on the PCB without embedded ECs;

$L_{EES}$  is the total length of the connections on the PCB with embedded ECs.

It should be noted that the problems that arise in high-speed electronic modules are associated with signal integrity [12, pp. 260–263], which, in turn, depends on the length of electrical connections. So, using the  $K_L$  factor you can indirectly evaluate the printed circuit boards by the integrity of the signals being transmitted.

### Conclusions

Thus, two versions of the EC embedding technology in printed circuit boards have been developed: embedding low-profile ECs in the fiberglass layer and in a monolithic layer of polyimide in the conditions of their installation without soldering or welding. Both methods allow improving the overall characteristics of printed circuit boards with embedded electronic components and can compete with known technologies. The indicators proposed for the quantitative evaluation of various design and technological solutions can help in carrying out studies of PCBs with embedded electronic components for their further development.

### REFERENCES

1. Nisan A. [Eight trends that will change electronics]. *Surface mounting*, 2011, no. 1, pp. 12-15. (Rus)
2. Nisan A. [Embedding passive and active components into printed circuit boards]. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2011, no. 6, pp. 84-92. (Rus)
3. Hochlun A. [Some trends in the development of world electronics. Perspectives for the Russian industry]. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2012, no. 6, pp. 146-152. (Rus)
4. [What is the future for us? New Technologies in the World and in Russia]. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2013, no. 3, pp. 48-51. (Rus)
5. Vern Solberg. Embedding passive and active components: PCB design and fabrication process variations. *IPC APEX EXPO*, 2015.
6. Ryabov V.A., Efimenko A.A. [Review of existing works on the manufacture of printed circuit boards with embedded electronic components]. *Biomedical Engineering and Electronics*, 2017, no 4. (Rus)
7. Vertyanov D.V. [An overview of foreign technologies of installation of chips and other components without soldering and without welding]. *Proc. of the conf. "New technologies of production of radio electronic devices and elemental base in domestic radio electronics"*, Zelenograd, 2013. (Rus)
8. Kosarev B.A. [The technology of embedding components into printed circuit boards]. *Modern problems of radiophysics and radio engineering: reports of a scientific seminar*, Omsk, 2012, pp. 40-43. (Rus)
9. Osmolovsky S.A. [Technological process parameters and reliability of embedded in the basis of the printed circuit board components]. *Materials of the II Int. Sc. Conf. "Modern trends of the technical sciences"*, Ufa, 2013, pp. 32-35. (Rus)
10. Ryder K.M. [Embedded components: comparative reliability analysis]. *IPC APEX EXPO*, 2012, no. 4, pp. 25-34.
11. PCB technology. Design, manufacture and installation of multilayer printed circuit boards. <http://www.pcbtech.ru/materialy-dlya-pechatnykh-plat-26.09.2017>
12. Romanova I. [Materials of the company Rogers Corporation for the production of RF and microwave PCBs]. *Printed mounting*, 2010, no. 2, pp. 34-37. (Rus)
13. Keciev L.N. [Designing of printed circuit boards for digital high-speed equipment]. Moscow, IDT Group, 2007, 616 p. (Rus)

Received 11.12 2017

DOI: 10.15222/ТКЕА2018.1.03  
УДК 621.3.049.77: 681.325

Д. т. н. А. А. ЄФІМЕНКО, В. О. РЯБОВ  
Україна, Одеський національний політехнічний університет  
E-mail: aiefimen@gmail.com

## ВАРІАНТИ ТЕХНОЛОГІЇ ВБУДОВУВАННЯ НИЗЬКОПРОФІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ У ДРУКОВАНІ ПЛАТИ

*Друковані плати (ДП) з вбудованими електронними компонентами є більш складними конструкціями у порівнянні зі звичайними багатошаровими ДП, але, без сумніву, мають переваги і перспективи при вирішенні проблем мікромініатюризації електронних пристроїв. Технології для їх реалізації постійно розвиваються, а також, що особливо важливо, збільшується номенклатура електронних компонентів (ЕК), адаптованих для вбудовування.*

*Вбудовані електронні компоненти – це компоненти, розташовані всередині, як правило, багатошарової структури ДП. Вони можуть бути двох типів: сформовані – це ЕК, які створюються у процесі виготовлення ДП на її внутрішніх шарах (можуть бути тільки пасивними); вставлені – це незалежно виготовлені дискретні компоненти, які розміщують на внутрішньому шарі ДП в процесі її виготовлення чи збірки (можуть бути як пасивними, так і активними, мають невеликі розміри, в першу чергу товщину).*

У даній роботі з метою покращення габаритних характеристик друкованих плат розроблено технології утворення багатошарових ДП з вбудованими низькопрофільними (НП) електронними компонентами у шар склотекстоліту та у монолітний шар полііміду, які монтуються без паяння та зварювання. Перший спосіб вбудовування відрізняється від відомих тим, що компоненти розміщуються не у сполучному шарі, а займають об'єм безпосередньо у шарі склотекстоліту. При використанні другої технології внутрішній шар із вбудованими ЕК є однією монолітною конструкцією, яка утворюється за допомогою заливання форми з встановленими НП ЕК поліімідним лаком з подальшою його полімеризацією та виконанням провідникового рисунку на цій плівці. Обидва способи дозволяють покращити габаритні характеристики друкованих плат з вбудованими електронними компонентами і можуть конкурувати із відомими технологіями.

Крім того, для кількісного оцінювання різних конструкторсько-технологічних рішень ДП в роботі запропоновано показники, які можуть допомогти при проведенні досліджень ДП із вбудованими ЕК для подальшого їх розвитку.

**Ключові слова:** вбудовані електронні компоненти, друковані плати, низькопрофільні електронні компоненти, сполучні шари, поліімідний лак.

Д. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО, В. А. РЯБОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: aiefimen@gmail.com

## ВАРИАНТЫ ТЕХНОЛОГИИ ВСТРАИВАНИЯ НИЗКОПРОФИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ В ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ

Печатные платы (ПП) со встроенными электронными компонентами являются более сложными конструкциями по сравнению с обычными многослойными ПП, но, без сомнения, имеют преимущества и перспективы при решении проблем микроминиатюризации электронных устройств. Технологии для их реализации постоянно развиваются, а также, что особенно важно, увеличивается номенклатура электронных компонентов (ЭК), адаптированных для встраивания.

Встроенные электронные компоненты — это компоненты, расположенные внутри, как правило, многослойной структуры ПП. Они могут быть двух типов: сформированные — это ЭК, которые создаются в процессе изготовления ПП на ее внутренних слоях (могут быть только пассивными); вставленные — это независимо изготовленные дискретные компоненты, которые размещают на внутреннем слое ПП в процессе ее изготовления или сборки (могут быть как пассивными, так и активными, имеют небольшие размеры, в первую очередь толщину).

В данной работе с целью улучшения габаритных характеристик печатных плат разработаны технологии образования многослойных ПП со встроенными низькопрофільними (НП) електронними компонентами в слой склотекстоліта і в монолітний шар полііміда, які монтуються без пайки і зварки. Перший спосіб встраивания отличается от известных тем, что компоненты размещаются не в связующем слое, а занимают объем непосредственно в слое склотекстоліта. При использовании второй технологии внутренний слой со встроенными ЭК является одной монолитной конструкцией, которая образуется с помощью заливки формы с установленными НП ЭК полиимидной лаком с последующей его полимеризацией и выполнением проводникового рисунка на этой пленке. Оба способа позволяют улучшить габаритные характеристики печатных плат со встроенными электронными компонентами и могут конкурировать с известными технологиями.

Кроме того, для количественной оценки различных конструкторско-технологических решений ПП в работе предложены показатели, которые могут помочь при проведении исследований ПП со встроенными ЭК для дальнейшего их развития.

**Ключевые слова:** встроенные электронные компоненты, печатные платы, низькопрофільні електронні компоненти, соединительные слои, полиимидной лак.

К. т. н. В. П. СИДОРЕНКО, к. т. н. А. И. РАДКЕВИЧ, Ю. В. ПРОКОФЬЕВ,  
Ю. В. ТАЯКИН, Т. М. ВИРОЗУБ

Украина, г. Киев, Институт микроприборов НАНУ

E-mail: upr41@ukr.net

## СБИС ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С РАСШИРЕННЫМ ПОЛЕМ АНАЛИЗА ДЛЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ

*Разработана специализированная СБИС для микроэлектронных координатно-чувствительных детекторов нового поколения — многокристалльных детекторов с расширенным полем анализа, которые могут использоваться в масс-спектрометрах и обеспечивать одновременное определение элементов, входящих в состав вещества, с высокой чувствительностью и точностью. СБИС спроектирована на основе современной КМОП-технологии с проектными нормами 1,0 мкм, что позволило получить частоту подсчета импульсов более 15 МГц, быстродействие в режиме считывания 10 МГц, рядность счетчиков 16.*

*Ключевые слова: СБИС, микроэлектронный координатно-чувствительный детектор, масс-спектрометрия, КМОП-технология, быстродействие микросхемы.*

Для оперативного проведения точного количественного анализа элементного состава многокомпонентных веществ служат масс-спектрометры, использующие многоканальные микроэлектронные координатно-чувствительные детекторы (МКЧД), что позволяет в реальном времени одновременно получать информацию про весь элементный состав анализируемого вещества. Такие масс-спектрометры находят широкое применение в горнодобывающей, металлургической, химической, фармацевтической промышленности, атомной энергетике, материаловедении, медицине, криминалистике, охране окружающей среды, космических исследованиях, научных исследованиях и пр. Преимущества использования многоканальных МКЧД по сравнению с методом фоторегистрации и методом последовательных измерений показаны в [1, 2].

Современные масс-спектрометры оснащаются многоканальными МКЧД в основном при изготовлении. Однако с учетом того, что эти приборы являются дорогостоящими, а многие из изготовленных в свое время в ПО «Селми» (г. Сумы) продолжают использоваться и сейчас, целесообразно использовать МКЧД для их модернизации с целью улучшения характеристик и функциональных возможностей.

В Институте микроприборов НАНУ ранее была разработана сверхбольшая интегральная схема (СБИС) УБ5709ИК01-2.11 для МКЧД [3, 4], на основе которой с использованием односантиметровых микроканальных пластин были

спроектированы и изготовлены экспериментальные образцы МКЧД [4]. В Институте прикладной физики НАНУ была проведена адаптация масс-спектрометра МС3103 для работы с экспериментальными образцами разработанных МКЧД в качестве детекторов ионов [1, 5]. Опытная эксплуатация детектора показала высокие характеристики прибора и подтвердила целесообразность проведения работ по расширению диапазона одновременно определяемых элементов за счет создания многокристалльных детекторов, повышению частоты подсчета импульсов и быстродействия в режиме чтения СБИС, улучшению воспроизводимости параметров в разных каналах приема и обработки информации СБИС.

Следует отметить, что аналогичные работы в Украине не проводятся. Из зарубежных наиболее близким аналогом является многоканальный детектор UWA, разработанный в Великобритании в Institute of Mathematical and Physical Sciences, University of Wales, Aberystwyth [6]. Детектор UWA выполнен на основе СБИС, которая содержит 768 каналов приема и обработки информации, что удалось достичь благодаря использованию технологии изготовления кристаллов с 0,5-мкм проектными нормами. Микросхема обеспечивает чувствительность  $2 \cdot 10^5$  электронов/счетный импульс, содержит 768 16-разрядных счетчиков, обеспечивает считывание информации на контроллер через кабель длиной 1,8 м на частоте 0,5 МГц. В [6] сообщается, что планируется создание детекторной СБИС на 1536 каналов

с использованием специальной технологии изготовления кристаллов.

В Институте микроприборов НАНУ в рамках Программы научного приборостроения НАН Украины на 2015–2019 гг. проводится работа по созданию приборов МКЧД нового поколения с расширенным полем анализа и улучшенными техническими характеристиками. В настоящее время завершен этап, на котором была разработана специализированная бескорпусная СБИС для МКЧД, спроектированная на основе современной КМОП-технологии с проектными нормами 1,0 мкм, что позволило получить частоту подсчета импульсов более 15 МГц, быстродействие в режиме считывания 10 МГц, разрядность счетчиков 16. Данная статья посвящена описанию этой разработки.

### Общие характеристики СБИС

Использование КМОП-технологии с проектными нормами 1 мкм (вместо 2,4 мкм в предыдущем варианте СБИС) и оптимизация схемотехнических и топологических решений позволили существенно улучшить технические характеристики микросхемы, а также увеличить объем накапливаемой и анализируемой информации в 64 раза по сравнению с СБИС УБ5709ИК01-2.11 за счет увеличения количества разрядов счетчиков с 10 до 16.

СБИС в составе МКЧД обеспечивает одновременное детектирование ионов изотопов элементов в широком спектре масс исследуемого вещества и в диапазоне концентраций от  $10^{-7}$  до 100 %.

СБИС изготавливается по КМОП-технологии с карманами *n*-типа, 384 электрода-датчика, которые вместе с соответствующими им усилителями-формирователями и счетчиками образуют 384 канала приема и обработки информации, СБИС включает 218603 транзистора на кристалле размером 9,8×8,9 мм.

Чувствительность СБИС по каждому входу составляет  $10^6$  электронов/импульс; максимальная частота приема информации — более 15 МГц; протокол обмена информацией микросхемы с периферией — последовательный, максимальная частота обмена — более 10 МГц.

Микросхема выполнена бескорпусной с использованием гибких носителях типа «алюминий — полиимид» (модификация 2). Конструкция микросхемы обеспечивает возможность монтажа на керамическую плату, позволяет проводить разварку и герметизацию внешних выводов, монтаж микроканальных пластин (МКП) над областью электродов и создавать многокристальные МКЧД.

СБИС сохраняет электрические параметры, требуемую стойкость к механическим и климатическим факторам, а также способность функционировать при давлении  $10^{-5}$  Па.

### Функциональная схема и режимы работы СБИС

На рис. 1, 2 представлены функциональные схемы одного канала и СБИС в целом, временная диаграмма работы микросхемы в основном такая же, как и СБИС УБ5709ИК01-2.11 [3, 4].

Импульс электронов, падающих на электроды микроканального умножителя, поступает на вход дифференциального каскада усилителя-формирователя DIF, на выходе OUT последнего формируется импульс, который подается на вход 16-разрядного счетчика SHV (рис. 1). Когда количество единиц счета хотя бы одного из счетчиков достигает 65529, на внешней контактной площадке PP (рис. 2) формируется напряжение низкого уровня (признак переполнения хотя бы одного счетчика). При этом входы переполненных счетчиков блокируются, остальные счетчики могут продолжать считать. После завершения считывания информации из переполненных счетчиков на внешнем выводе PP снова формируется напряжение высокого уровня. Счет может быть остановлен также вручную оператором путем подачи напряжения низкого уровня на внешний вывод STOP (рис. 2), в этом случае блокируются входы всех счетчиков СБИС.

Для начала считывания информации на вывод BREK (рис. 2) подается импульс высокого уровня, который должен перекрывать уровень как минимум одного импульса тактирования (CLK). На выходе OE появляется сигнал низкого уровня, который определяет начало и конец информационного потока. Во время первого тактового импульса на выходы Q1...Q8 выводится информация, накопленная в счетчике первого канала. По следующим тактовым импульсам происходит считывание информации из счетчиков следующих каналов. Для уменьшения количества выводов СБИС применено мультиплексирование информационных выходов Q1...Q8. Для выдачи информации с 16-разрядного счетчика используется восемь выводов, при этом по высокому уровню тактовых сигналов выдается информация младших разрядов, а по низкому уровню — старших. По последнему тактовому импульсу считывания информации на выходе EREK выдается сигнал, который может использоваться для начала считывания информации (BREK) со следующей микросхемы в многокристальных приборах МКЧД.

Перед началом работы микросхемы необходимо очистить внутренний регистр и счетчи-

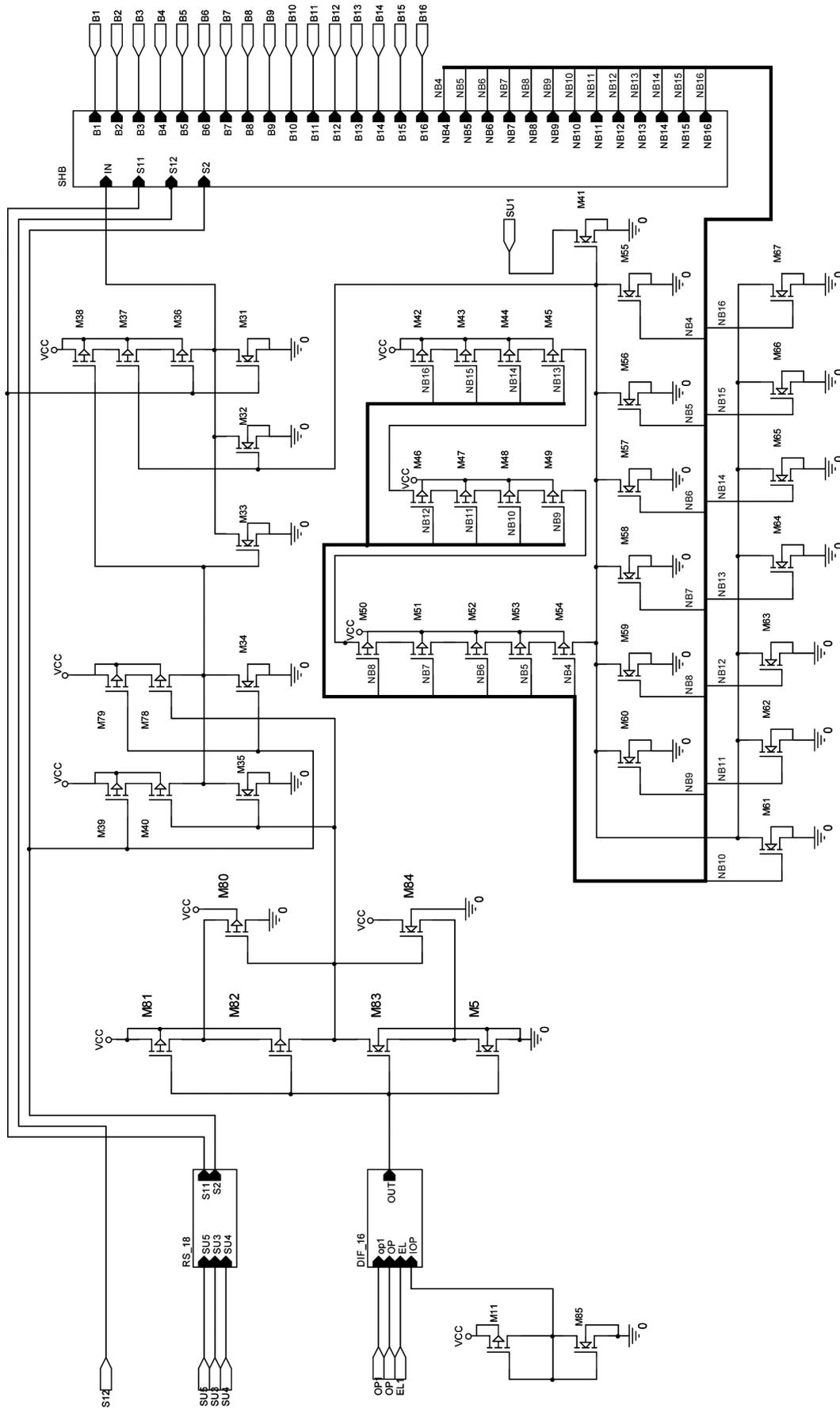


Рис. 1. Электрическая функциональная схема одного канала СБИС

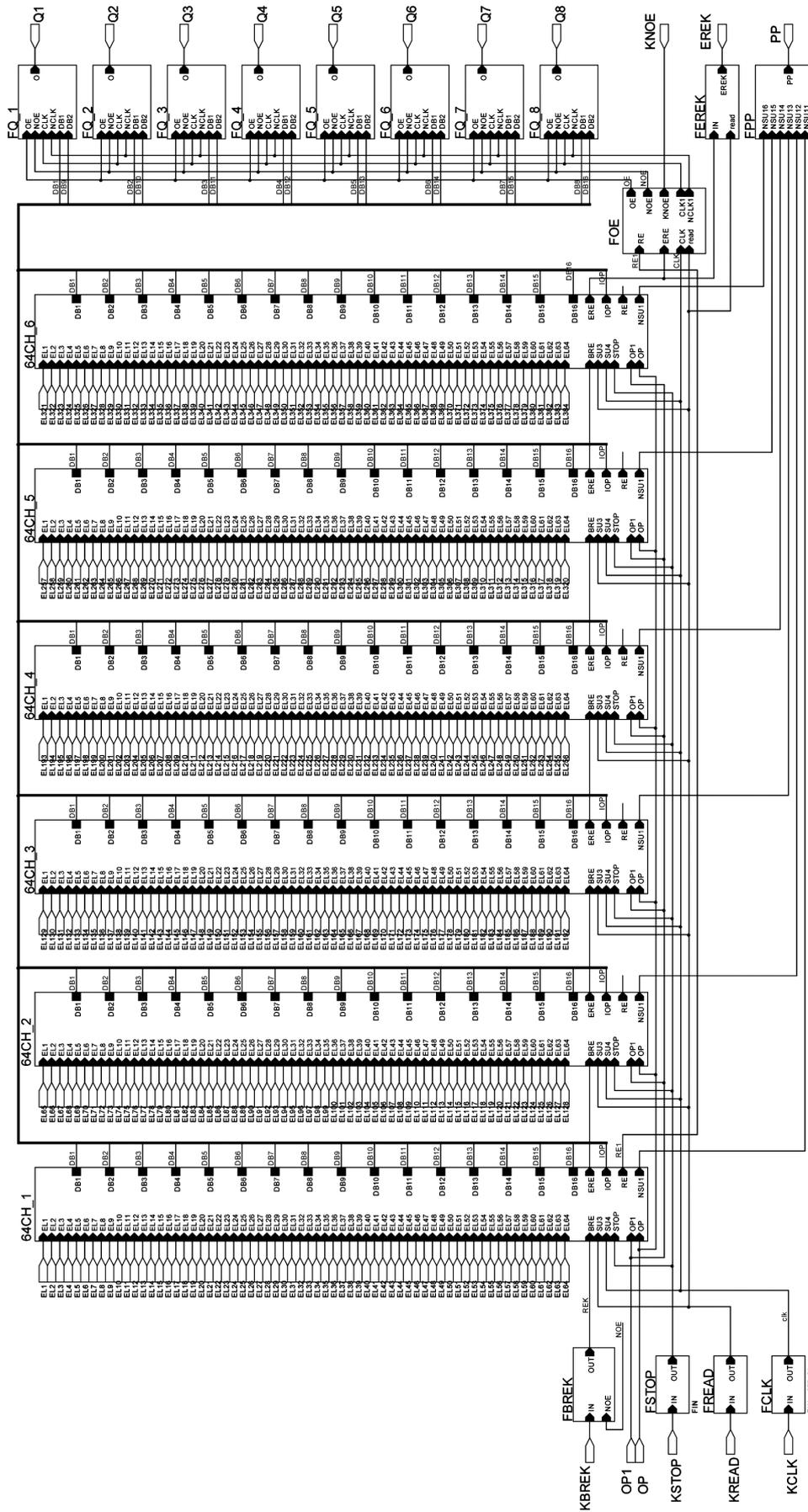


Рис. 2. Электрическая функциональная схема СБИС

ки. Для очистки регистра надо подать на вывод KREAD напряжение низкого уровня длительностью не менее одного импульса тактирования, для очистки счетчиков нужно провести цикл считывания информации.

В промежутках между циклами считывания информации и в режиме «Невыбор микросхемы» выходы Q1...Q8 находятся в третьем состоянии, что позволяет объединять одноименные выходы нескольких микросхем в многокристальном варианте исполнения МКЧД.

Для контроля функционирования кристалла в СБИС предусмотрены внешние выводы TEST1 и TEST2, на которые подается отрицательный импульс специальной формы. За счет емкостной связи этот импульс создает на электродах детектора потенциал, имитирующий импульс электронов от микроканального умножителя. Изменяя напряжение на указанных выводах, можно проконтролировать работоспособность кристалла и оценить чувствительность и быстродействие усилителя.

### Усилитель-формирователь счетных импульсов и обработка принимаемой информации

Наиболее важным функциональным элементом схемы, определяющим параметры микроэлектронного координатно-чувствительного детектора, является входной усилитель-формирователь. Поэтому для обеспечения воспроизводимости параметров СБИС необходимо, чтобы его характеристики были максимально независимы от разброса технологических параметров,

связанных с фотолитографическими, окислительными и другими технологическими процессами. С этой целью в схему входного усилителя-формирователя (рис. 3) включены два источника опорного напряжения OP и OP1 [7], благодаря чему исходный сдвиг проводимостей его ветвей определяется в основном не конструктивными параметрами транзисторов, а напряжением на их затворах в исходном состоянии  $U_{OP}$  и  $U_{OP1}$  (их разностью). Такое решение позволило также оптимизировать чувствительность усилителя для конкретных условий измерений.

Аналоговая часть усилителя-формирователя содержит дифференциальный каскад с активной нагрузкой в виде токового зеркала на транзисторах M3...M7 и инвертор на транзисторах M8, M9. Первый вход дифференциального каскада (затвор транзистора M4) подключен к соответствующему электроду датчика EL, на второй (затвор транзистора M7) подается напряжение  $U_{OP}$  от источника опорного напряжения OP. Первый вход дифференциального каскада также через параллельно соединенные n-канальные транзисторы M1 и M2 подключен к источнику опорного напряжения OP1. При этом на затвор транзистора M1 подается напряжение от источника питания  $V_{CC}$ , а затвор транзистора M2 подключен к выходу инвертора на транзисторах M8, M9.

В исходном состоянии входная емкость усилителя-формирователя через транзистор M1 заряжается от источника опорного напряжения OP1, и на затворе транзистора M4 устанавливается напряжение  $U_{OP1}$ . Поскольку крутизна

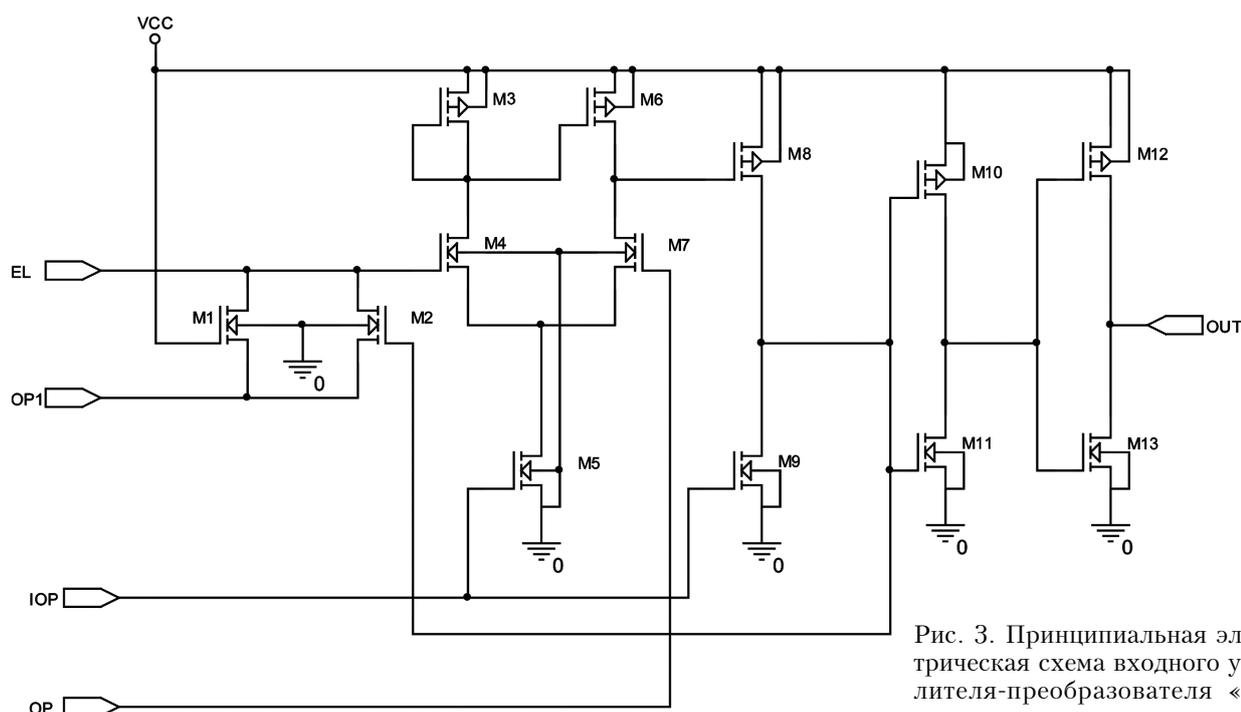


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема входного усилителя-преобразователя «заряд — импульс»

транзистора низкая, он не влияет на процесс формирования счетных импульсов, но предохраняет от возможного натекания положительных зарядов на вход усилителя-формирователя. Поскольку конструктивно транзисторы М4 и М7 выполнены одинаковыми, а напряжение  $U_{OP1}$  выбирается выше, чем напряжение  $U_{OP}$ , ток в цепи транзистора М4 выше, чем в цепи транзистора М7, и пока транзистор М6 находится в состоянии насыщения, он работает в режиме токового зеркала транзистора М3, и его ток превышает ток транзистора М7. В связи с этим напряжение на выходе дифференциального каскада растет до тех пор, пока транзистор М6 не выйдет из насыщения и токи транзисторов М6 и М7 не сравняются. При этом на стоке транзистора М6 установится высокое напряжение, близкое к напряжению  $V_{CC}$ , а  $p$ -канальный транзистор М8 будет закрыт, и на выходе инвертора на транзисторах М8, М9 и на выходе усилителя-формирователя ОУТ установится низкий уровень напряжения.

Импульс электронов, поступающий с выхода МКП на соответствующий электрод-датчик, разряжает входную емкость усилителя-формирователя. Напряжение на затворе транзистора М4 падает, и его ток уменьшается, а ток транзистора М7 растет. Если падение напряжения на затворе транзистора М4 превысит порог чувствительности усилителя-формирователя, ток транзистора М7 станет больше тока в цепи транзисторов М4, М3 и, следовательно, тока транзистора М6. Напряжение на стоках транзисторов М6, М7 падает до тех пор, пока транзистор М6 не войдет в насыщение, а транзистор М7 не выйдет из насыщения, и токи транзисторов М6 и М7 не сравняются. При этом в узле стоков транзисторов М6 и М7 установится низкое напряжение,  $p$ -канальный транзистор М8 откроется, и на выходе инвертора М8, М9 и на выходе ОУТ усилителя-формирователя установится высокое напряжение, близкое к напряжению питания  $V_{CC}$ , что завершит формирование переднего фронта счетного импульса.

В исходное состояние схема возвращается за счет обратной связи через транзистор М2. Когда потенциал узла стоков транзисторов М4 и М10 превысит потенциал на затворе транзистора М6 на величину большую, чем пороговое напряжение транзистора М2, транзистор М2 откроется и начнется обратный процесс. Узел затвора транзистора М6 начнет заряжаться до уровня опорного напряжения  $U_{OP1}$ , и произойдет возвращение схемы в исходное состояние, что завершит цикл формирования счетного импульса.

Таким образом, в результате падения ионов на микроканальную пластину и создания

лавин электронов, которые заряжают соответствующие электроды-датчики EL1...EL384, на выходах ОУТ соответствующих усилителей-формирователей DIF1...DIF384 формируются счетные положительные импульсы, количество которых пропорционально величине принимаемого заряда. Полученные импульсы поступают на входы соответствующих счетчиков SHB1...SHB384.

При проектировании усилителя-формирователя были решены различные задачи, такие как поиск оптимального соотношения величин тока, чувствительности и быстродействия усилителя, уменьшение габаритов (необходимость согласовать размер по оси  $X$  с шагом электродов), обеспечение передачи счетных импульсов на далеко расположенные счетчики, уход от критических размеров в аналоговой части усилителя-формирователя. Было оптимизировано соотношение между величиной  $I_{OP}$ , размерами транзисторов М3 и М4 и выходных транзисторов М13 и М14, обеспечивающих перезаряд нагрузочной емкости величиной до 2 пФ. Для снижения емкостной нагрузки в узле стоков транзисторов М8, М9 был дополнительно введен инвертор на транзисторах М10 и М11, перезаряд которого в наибольшей степени определяет быстродействие усилителя формирователя.

Функционирование схемы и параметры усилителя-формирователя и СБИС в целом были проверены путем моделирования на ЭВМ с использованием пакета OrCAD v.16.6 фирмы Cadence. Были использованы модели КМОП-транзисторов BSIM3v3 (Level 7) для расчетов с использованием программы PSpice.

Моделирование проводилось со значениями частоты 20 МГц для записи и 10 МГц для считывания и подтвердило возможность функционирования схемы с таким быстродействием.

МКЧД с использованием МКП и разработанной СБИС должен обеспечивать прямой счет ионов. Коэффициент усиления МКП ( $k_{МКП}$ ) в шевронной сборке двух пластин составляет  $10^6$ . Поэтому необходимо обеспечить срабатывание усилителя-формирователя и формирование счетного импульса при поступлении на электрод-датчик заряда, равного

$$Q_{вх} = q_e k_{МКП} = -1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^6 = -1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Кл.}$$

Входная емкость разработанного усилителя-формирователя составляет  $C_{вх} = 0,9$  пФ, при этом отрицательный перепад напряжения на входе усилителя-формирователя будет равен

$$U_{вх} = Q_{вх} / C_{вх} = -0,18 \text{ В.}$$

Результаты проведенного расчета показали, что при  $U_{OP} = 2,5$  В изменение напряжения на входе усилителя-формирователя от 2,274 до 2,261 В

вызывает изменение напряжения на стоках транзисторов M6, M7 от 3,089 до 2,671 В, на выходе инвертора на транзисторах M8, M9 — от 0,727 до 4,180 В, на выходе усилителя-формирователя OUT — от 0 В до 4,9 В, т. е. расчетная величина чувствительности МКЧД на порядок выше требуемой, а реальная чувствительность будет зависеть лишь от уровня помехозащищенности при проведении измерений.

Таким образом, усилитель-формирователь преобразует импульс электронов, поступающий с выхода МКП на электрод-датчик, в счетный импульс, обеспечивая усиление входного напряжения в 400 раз и формирование счетного импульса.

### Заключение

При разработке СБИС решены задачи, связанные прежде всего с созданием многокристалльных МКЧД. По сравнению с ранее разработанной СБИС УБ5709ИК01-2.11 было достигнуто:

- увеличение разрядности счетчиков до 16, что увеличило объем принимаемой и обрабатываемой информации в 64 раза;
- повышение в 5 раз, т. е. до 15 МГц, быстродействия при записи информации (для исключения пропусков входной информации);
- увеличение в 2,5 раза, т. е. до 10 МГц, быстродействия при считывании;
- улучшение чувствительности за счет создания возможности ее регулирования для конкретных условий эксперимента;
- обеспечена более высокая воспроизводимость параметров, прежде всего чувствительности и быстродействия, разных каналов СБИС и разных СБИС.

На следующем этапе будет разработан и изготовлен микроэлектронный координатно-чувствительный детектор с использованием пяти таких СБИС и 5-см микроканальных пластин. В

этом случае протяженность фокальной плоскости магнитного анализатора масс-спектрометра увеличится до 5 см, что позволит увеличить количество одновременно анализируемых элементов и в пять раз сократить время анализа всего спектра элементов.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сидоренко В.П., Прокофьев Ю.В., Мурченко Д.С. и др. Координатно-чувствительный детектор заряженных частиц для спектроскопии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2016. — № 4–5. — С. 53–60. — <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2016.4-5.53>
2. Langstaff D. P., Chase T., Roberts O. R., McGlynn A., Veary-Roberts A. R., Evans D. A., Greaves G.N. A 768-channel detector for photoelectron spectroscopy using synchrotron radiation. — SRMS-5 Conference. — Chicago, 2006.
3. Сидоренко В.П., Вербицкий В.Г., Прокофьев Ю.В. и др. СБИС для микроэлектронного координатно-чувствительного детектора приборов элементного анализа материалов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 2. — С. 25–29.
4. Сидоренко В.П., Вербицкий В.Г., Прокофьев Ю.В. Схемотехника СБИС для микроэлектронного координатно-чувствительного детектора для элементного анализа материалов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 4. — С. 39–46.
5. Борискин А.И., Ерёмченко В.М., Мордик С.Н. и др. Исследование ионно-оптических характеристик лазерного масс-спектрометра с координатно-чувствительным микроэлектронным детектором // Журнал технической физики. — 2008. — Т. 78, № 7. — С. 111–117.
6. Langstaff D.P., Evans D.A., Roberts O.R., Zhu Xi. Progress on the aberystwyth electron counting array // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Vol. 604, iss. 1–2. — P. 133–135. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2009.01.040>
7. Заявка № а 2016 12093 від 29.11.2016 на одержання патенту України «Мікроелектронний координатно-чутливий детектор для спектроскопії» / Єременко В.М., Мурченко Д.С., Прокоф'єв Ю.В. та ін.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 18.12 2017 г.

В. П. СИДОРЕНКО, О. І. РАДКЕВИЧ,  
Ю. В. ПРОКОФ'ЄВ, Ю. В. ТАЯКІН, Т. М. ВІРОЗУБ

Україна, м. Київ, Інститут мікроприладів НАН України  
E-mail: upr41@ukr.net

## НВІС ДЛЯ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО КООРДИНАТНО-ЧУТЛИВОГО ДЕТЕКТОРА НОВОГО ПОКОЛІННЯ З РОЗШИРЕНИМ ПОЛЕМ АНАЛІЗУ ДЛЯ МАС-СПЕКТРОМЕТРІЇ

*Для оперативного проведення точного кількісного аналізу елементного складу багатоконпонентних речовин служать мас-спектрометри, в яких використовуються багатоканальні мікроелектронні координатно-чутливі детектори (МКЧД).*

*Розроблено спеціалізовану надвелику інтегральну схему (НВІС) для приладів МКЧД нового покоління — багатокристалльних детекторів з розширеним полем аналізу і більш високими технічними характеристиками, які можуть використовуватися в приладах елементного аналізу речовини, забезпечуючи одночасний аналіз елементного складу з високою чутливістю і точністю.*

*НВІС є функціонально завершеною одиницею і містить 384 каналів прийому і обробки інформації та схему керування процесами реєстрації, накопичення та видачі інформації в цифровій формі на зовнішній контролер. Кожний канал включає електрод-датчик, що приймає імпульс електронів від помножувача електронів на мікроканальній пластині, підсилювач-формував, який перетворює електричний заряд*

електронів в лічильний імпульс, 16-розрядний лічильник імпульсів, розряд 384-розрядного послідовно-паралельного регістру зсуву, який забезпечує послідовне зчитування інформації з лічильників кожного каналу. Розробку НВІС проведено на основі сучасної КМОН-технології з проектними нормами 1,0 мкм. Швидкодія мікросхеми в режимі рахунку становить не менше 15 МГц, в режимі зчитування інформації з лічильників – більше 10 МГц.

У НВІС для зменшення кількості виводів застосовано мультиплексування інформаційних виводів. Для видачі інформації з 16-розрядного лічильника використовується вісім виводів, при цьому при високому рівні тактових сигналів видається інформація молодших розрядів, а при низькому рівні – старших.

Конструкцію НВІС розраховано на можливість створення багатокристалних детекторів з розширеним полем аналізу, в яких кількість кристалів ВІС обмежується тільки розмірами наявних мікроканальних пластин.

**Ключеві слова:** спеціалізована НВІС, мікроелектронний координатно-чутливий детектор, мас-спектрометрія, КМОН-технологія, швидкодія мікросхеми.

DOI: 10.15222/ТКЕА2018.1.13  
UDC 621.3.049.77: 681.325

V. P. SIDORENKO, O. I. RADKEVICH, Yu. V. PROKOFIEV,  
Yu. V. TAYAKIN, T. M. VIROZUB

Ukraine, Kyiv, Institute of Microdevices of NAS of Ukraine  
E-mail: upr41@ukr.net

## VLSI FOR A NEW GENERATION OF MICROELECTRONIC COORDINATE-SENSITIVE DETECTORS WITH AN EXTENDED FIELD OF ANALYSIS FOR USE IN MASS SPECTROMETRY

*The authors have developed a custom VLSI chip for the new generation of MCSD devices – multichip detectors with an extended analysis field and higher technical characteristics, which can be used in elemental analysis devices to simultaneously determine the elements that make up the material with high sensitivity and accuracy in real time.*

*VLSI chip contains 384 channels with a spatial resolution of 25 microns has been integrated onto a single chip, each channel has a metal anode to collect the electrons as they emerge from the microchannel plate electron multiplier (MCP); a charge sensitive amplifier to produce a digital signal in response to the electron pulse and a 16-bit counter associated with it to accumulate the counts as they arrive and circuitry to read out the data sequentially from all channels in the microcircuit. The VLSI chip is designed according to the design rules standard 1,0 μm CMOS process. The speed of the microcircuit in the counting mode is at least 15 MHz, in the mode of reading information from the counters – more than 10 MHz.*

*The output from the 16-bit counters on the detectors is presented via an 8-bit port and is read into the control electronics sequentially from each counter in turn in low-byte, high-byte order.*

*The circuit has been designed in such a way that an arbitrary number of detector chips may be abutted together on a substrate behind the MCP, allowing for long focal plane detectors to be built, limited only by the size of MCPs available.*

**Keywords:** custom VLSI, microelectronic coordinate-sensitive detector, mass spectrometry CMOS process, speed of the microcircuit.

### REFERENCES

1. Sidorenko V. P., Prokofiev Yu. V., Murchenko D. S., Yeremenko V. M., Shelekhov A. V. [Coordinate-sensitive charged particle detector for spectroscopy]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2016, no. 4-5, pp.53-60. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2016.4-5.53> (Rus)
2. Langstaff D. P., Chase T., Roberts O. R., McGlynn A., Veary-Roberts A. R., Evans D. A., Greaves G.N. A 768-channel detector for photoelectron spectroscopy using synchrotron radiation. – SRMS-5 Conference, Chicago July 30-Aug.2, 2006.
2. Sidorenko V. P., Verbitskiy V. G., Prokofiev Yu. V., Kyziak A. Yu., Nikolayenko Yu. E. [VLSI for microelectronic coordinate-sensitive detector of the devices for element analysis of substance]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v elektronnoi Apparature*, 2009, no. 2, pp. 26-29. (Rus)
4. Sidorenko V. P., Verbitskiy V. G., Prokofiev Yu. V. [Circuit design of VLSI for microelectronic coordinate-

sensitive detector for material element analysis]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2012, no. 4, pp.39-46. (Rus)

5. Boriskin A. I., Eremenko V. M., Mordik S. N., Savin O. R., Skripchenko A. N., Storizhko V. E., Khomenko S. N. Ion-optical characteristics of a laser mass spectrometer with a coordinate-sensitive microelectronic detector. *Technical Physics*, 2008, vol. 53, iss. 7, pp. 927-933. (Rus)

6. Langstaff D.P., Evans D.A., Roberts O.R., Zhu Xi. Progress on the aberystwyth electron counting array. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, vol. 604, no. 1-2, pp. 133-135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2009.01.040>

7. Eremenko V. M., Murchenko D. S., Prokofiev Yu. V. et al. [Microelectronic Coordinate Sensitive Detector for Spectrometry]. *Ukraine patent application*, no. a 2016 12093, 2016. (Ukr)

К. т. н. В. П. СИДОРЕНКО, к. т. н. В. Д. ЖОРА, к. т. н. А. И. РАДКЕВИЧ,  
В. П. ГРУНЯНСКАЯ, Ю. В. ПРОКОФЬЕВ, Ю. В. ТАЯКИН, Т. М. ВИРОЗУБ

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАН Украины

E-mail: vdzhora@gmail.com

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

*Рассмотрены особенности конструкции и технологии сборки микроэлектронных координатно-чувствительных детекторов заряженных частиц для спектроскопии с использованием гибких носителей типа «алюминий – полиимид». Данная конструкция, основой которой является специализированная СБИС, обеспечивает высокую надежность изделий за счет применения многослойных керамических оснований и ультразвуковой сварки, используемых при изготовлении микроэлектронной аппаратуры специального назначения, в том числе стойкой к воздействию специальных внешних воздействующих факторов. Показаны преимущества выбранной технологии в сравнении с другими методами сборки.*

*Ключевые слова: микроэлектронный координатно-чувствительный детектор, специализированная СБИС, гибкий полиимидный носитель, ультразвуковая сварка.*

Использование микроэлектронных координатно-чувствительных детекторов (МКЧД) позволяет создавать высокочувствительные приборы элементного анализа веществ, в том числе масс-спектрометры и другую аналитическую аппаратуру регистрации пространственного положения пучков нейтральных и заряженных частиц. Применение таких приборов является весьма перспективным во многих отраслях промышленности, в частности в металлургии, химическом, фармацевтическом и горнодобывающем производствах, атомной энергетике, материаловедении, медицине, криминалистике, космических исследованиях, экологии и пр. В [1] была показана возможность создания нового поколения многокристалльных детекторов, содержащих линейку, например, из пяти чувствительных кристаллов вместо используемого в настоящее время одного. В настоящее время возрастает интерес к таким новейшим приборам, в том числе со стороны зарубежных фирм, и при этом сохраняется устойчивый интерес и к более дешевым однокристалльным микроэлектронным координатно-чувствительным детекторам.

Принцип работы приборов, основу которых составляет одна специализированная сверхбольшая интегральная схема (СБИС), описан в [1]. Кристаллы СБИС, изготавливаемые по КМОП-технологии с карманами  $n$ -типа, конструкция которых детально описана в [2, 3], содержат зарядочувствительную матрицу, предназначенную для детектирования ионов изотопов элемен-

тов в широком спектре масс исследуемого вещества и в широком диапазоне концентраций (от  $10^{-7}$  до 100%). Остальная часть полупроводникового кристалла должна быть закрыта экраном для предотвращения попадания зарядов на другие области СБИС. При этом важна высокая точность совмещения окна в экране с зарядочувствительной областью данного кристалла.

Кроме вышеупомянутой СБИС, размещаемой на многослойном керамическом основании, данные приборы содержат микроканальную пластину (МКП) фирмы Hamamatsu (Япония), электроды для подвода к МКП высокого напряжения (2,0 кВ), немагнитный металлический экран для защиты элементов конструкции прибора от попадания ионов (кроме зарядочувствительной области), разъем и другие конструктивные элементы. С учетом сложности конструкции новейшего прибора [4], включающего пять СБИС, и необходимости точного позиционирования деталей становится целесообразным пересмотр ранее используемых конструктивно-технологических решений для выбора оптимальной конструкции и технологии сборки приборов.

Целью настоящей работы является выбор оптимальной технологии сборки, обеспечивающей возможность реализации сборки нового поколения МКЧД на основе новой СБИС как однокристалльной, так и многокристалльной конструкции, желательно с использованием как можно большего числа универсальных деталей и узлов.

### Выбор метода сборки с учетом особенностей конструкции МКЧД

Как известно [5], монтаж кристаллов интегральных схем на подложку осуществляют одним из четырех методов:

- термокомпрессионной микросваркой (wire bonding) с применением проволочных проводников;

- с использованием гибких ленточных носителей (чаще всего методом ТАВ, Tape Automated Bonding);

- методом перевернутого кристалла (flip chip), при котором присоединение кристаллов к подложке проводится с использованием шариковых выводов, предварительно выращиваемых на кристаллах;

- с использованием балочных выводов, выращиваемых на кристаллах и выступающих за их края.

Последние три метода отличаются применением так называемых организованных выводов, обеспечивающих полную автоматизацию монтажа бескорпусных кристаллов на подложки микросборок [6].

Каждый из перечисленных методов имеет свои преимущества и недостатки, однако при непосредственном монтаже кристаллов СБИС на подложку наиболее часто используются гибкие носители, обеспечивающие повышенную надежность соединений за счет большей ширины проводников в сравнении с проволочными [7] и демпфирующих свойств гибких носителей в сравнении с балочными и шариковыми выводами.

В [7] были детально рассмотрены преимущества метода сборки микросхем на гибком полиимидном носителе (ГПН) типа «алюминий – полиимид» (так называемой модификации 2) и показано, что этот метод наиболее полно отвечает комплексу требований к монтажу изделий микроэлектроники, важнейшими из которых являются надежность, обеспечение высокой плотности монтажа микроэлектронной аппаратуры

[7, 8], возможность использования для сборки СБИС, работающих в условиях радиационных нагрузок [9]. Применение данного метода, на наш взгляд, лучше других обеспечивает возможность реализации сборки не только однокристалльных, но и многокристалльных конструкций МКЧД, поскольку позволяет наиболее просто создать линейку, например, из пяти кристаллов при минимально возможном зазоре между ними. Кроме того, упрощается изготовление и размещение электродов для подвода высокого напряжения к МКП, которые изготавливаются теми же методами, что и гибкие носители.

На основании перечисленных преимуществ метод сборки микросхем на гибком носителе типа «алюминий – полиимид» был выбран нами для монтажа кристаллов новых специализированных СБИС [4], предназначенных для использования в МКЧД. Его особенностью является то, что алюминиевые выводы ГПН закреплены на плоском полиимидном основании, что значительно упрощает процесс сборки приборов МКЧД и позволяет проводить послойный монтаж всех узлов прибора.

Конструктивно СБИС на гибком носителе (рис. 1) представляет собой полупроводниковый кристалл, соединенный с предварительно изготовленным ГПН [10]. Рабочую поверхность кристалла, как правило, защищают полимерным компаундом. Выбор конкретного защитного материала в общем случае определяется условиями эксплуатации СБИС, чувствительностью кристалла к поверхностным загрязнениям, а также совместимостью этого материала с другими конструкционными материалами микросхемы и микроэлектронной аппаратуры в целом [10]. На кристаллах СБИС, используемых в приборах МКЧД, компаундом защищали только места присоединения выводов ГПН к контактным площадкам этих кристаллов.

В свою очередь, гибкий носитель [10] выполняется в виде нескольких взаимосвязанных зон – периферийной, контактирования, монтаж-

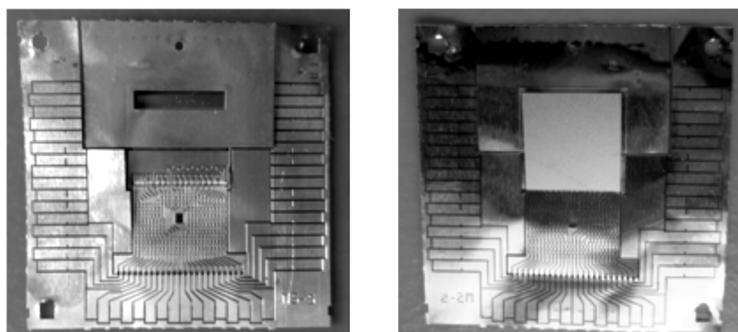


Рис. 1. Специализированная БИС на гибком носителе для использования в приборах МКЧД (слева – вид со стороны алюминия, справа – вид со стороны полиимида)

ной и внутренней, которые состоят из унифицированных элементов, изменяющих свое положение в зависимости от расположения контактных площадок кристалла.

Периферийная зона предназначена для фиксации носителя и микросхемы в целом в процессах их изготовления и монтажа. В ней выполнены базовые фиксирующие отверстия, позволяющие сохранять необходимую точность фиксации при проведении необходимых измерений параметров и испытаний, а также при монтаже в микроэлектронную аппаратуру.

В зоне контактирования с шагом 1,25 мм расположены площадки строго определенных размеров для подключения зондов контактирующих устройств в процессе измерения электрических параметров микросхемы. В СБИС, используемой в приборах МКЧД, из-за конструктивных особенностей расположение этих контактных площадок трехстороннее.

В монтажной зоне имеется контур вырубki, по которому от микросхемы отделяют периферийную зону и зону контактирования перед монтажом бескорпусной СБИС на керамическую плату.

Внутренние зоны однокристалльных и многокристалльных конструкций МКЧД несколько различаются. В первом случае эта зона включает ряд функциональных элементов и имеет форму, показанную на рис. 2, а. Для пятикристалльной конструкции она несколько изменена для обеспечения возможности создания линейки кристаллов с минимально возможным зазором между ними — не более 100 мкм (рис. 2, б), что достигается при выполнении следующих условий:

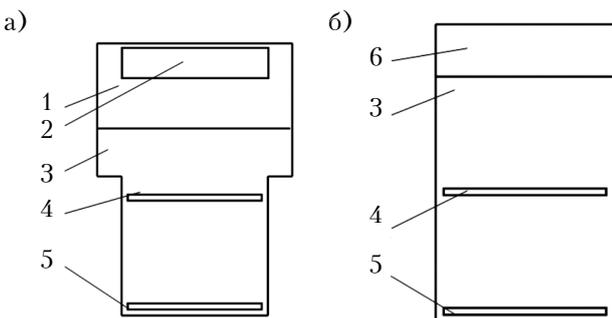


Рис. 2. Расположение и функциональное назначение элементов внутренней зоны СБИС на гибком носителе для однокристалльной (а) и пятикристалльной (б) конструкций:

1 — область сплошной металлизации для контактирования с МКП; 2 — окно над детекторами заряда; 3 — экран; 4 — места присоединения выводов носителя к кристаллу; 5 — места расположения внешних выводов для приварки к керамической плате; 6 — зарядочувствительная область кристалла

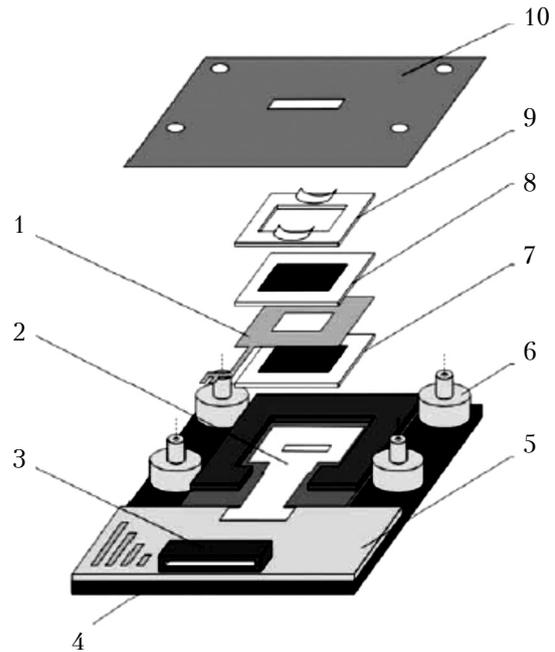


Рис. 3. Основные узлы МКЧД:

1 — промежуточные электроды к МКП (общая толщина 100 мкм); 2 — кристалл СБИС на гибком носителе; 3 — ZIF-разъем XF-2M 2415; 4 — керамическое основание; 5 — печатная плата (стеклотекстолит); 6 — стойка крепления экрана; 7, 8 — МКП с керамическим обрамлением; 9 — прижимная рамка; 10 — экран

- ширина внутренней зоны ГПН не должна превышать ширину кристаллов СБИС;
- ширина зоны монтажа СБИС на керамическую плату также не должна превышать ширину этих кристаллов;
- зарядочувствительные области кристаллов при их размещении в линейку должны образовывать общую чувствительную зону.

При этом в обоих случаях внутренние выводы гибкого носителя привариваются непосредственно к контактным площадкам кристаллов, а внешние — к контактным площадкам многослойной керамической платы.

Основные узлы МКЧД, используемые для сборки однокристалльной конструкции прибора, показаны на рис. 3 [1].

Из-за хрупкости микроканальных пластин и их высокой стоимости были найдены конструктивные решения [1], направленные на защиту МКП от механических нагрузок, возникающих при монтаже и при эксплуатации приборов в широком температурном диапазоне (0—150°С). Каждая МКП устанавливается в специальную керамическую рамку (обрамление) из вакуумной керамики ВК-96 с отверстием для МКП. Две пластины МКП собираются в отдельный функ-

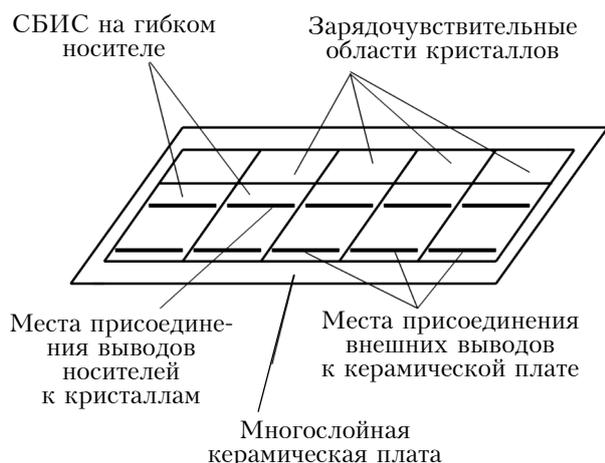


Рис. 4. Общая схема расположения кристаллов СБИС на керамической плате для пятикристальной линейки

циональный и конструктивный узел (шевронная сборка). Входная поверхность верхней МКП, куда попадает ионный пучок, является фокальной плоскостью детектора. Рамки для МКП изготавливаются по той же технологии, что и многослойные керамические платы.

Электрический контакт к МКП для подвода высокого напряжения обеспечивается двумя промежуточными электродами, изготавливаемыми из фольгированного диэлектрика толщиной 50 мкм каждый (слой алюминия 30 мкм и полиимид 20 мкм). Нижний промежуточный электрод устанавливается металлической стороной вниз и обеспечивает подачу потенциала на верхнюю поверхность нижней МКП, верхний промежуточный электрод — металлизацией вверх и обеспечивает подачу потенциала на нижнюю поверхность верхней МКП. Внешние окончания этих электродов присоединяются к металлизированным дорожкам керамического основания методом ультразвуковой сварки.

Керамические элементы корпуса изготавливаются из керамики ВК-96 лазерной резкой с по-

следующим шлифованием для обеспечения необходимой точности размеров.

Общая схема расположения кристаллов СБИС в случае пятикристальной линейки представлена на рис. 4.

### Особенности технологии сборки микросхем и приборов МКЧД

Новые универсальные кристаллы СБИС с более высокими проектными нормами 1,0 мкм [4] (на ранней конструкции кристаллов — 2,4 мкм) для реализации сборки как однокристалльных, так и многокристалльных конструкций МКЧД, предполагается изготавливать за рубежом.

Технология изготовления ГПН описана в [8]. Гибкие полиимидные носители, как и промежуточные электроды, изготавливают из фольгированного диэлектрика толщиной 50 мкм (слой алюминия 30 мкм и полиимид 20 мкм) по одной технологии.

При использовании ГПН типа «алюминий — полиимид» алюминиевые выводы привариваются ультразвуковой сваркой непосредственно к контактным площадкам полупроводникового кристалла, также выполненным из алюминия, чем обеспечивается совместимость выводов ГПН с кристаллами микросхем [7, 10]. При этом в местах соединения выводов с контактными площадками кристаллов образуется однокомпонентная система Al — Al, в которой исключается появление хрупких интерметаллических соединений в твердой фазе при эксплуатации приборов, в том числе при повышенной температуре [7], чем обеспечивается повышение надежности СБИС. Этому способствует также большее поперечное сечение выводов гибкого носителя в сравнении с проволочными соединениями, что делает их более прочными и облегчает отвод тепла от кристалла [7].

Все операции по сборке элементов прибора выполняются под микроскопом типа МБС-9

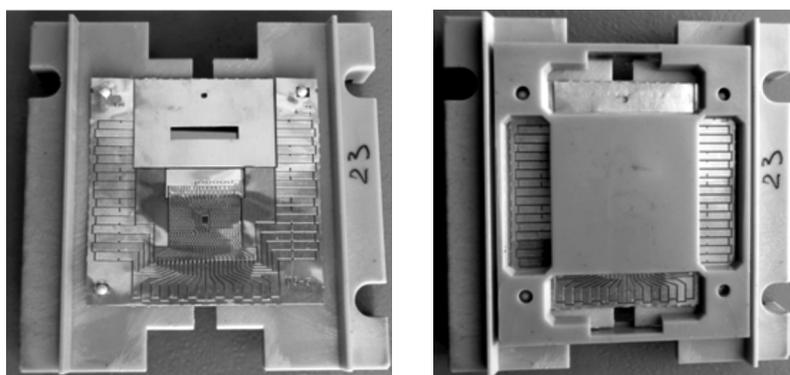


Рис. 5. Микросхемы на гибком носителе, помещенные в тару-спутник (слева — без крышки, справа — закрытые крышкой)

для обеспечения точного позиционирования деталей. Процесс ультразвуковой сварки также проводится под микроскопом на специализированной установке УСИММ1. Для формирования надежного сварного соединения точно дозируют энергию ультразвуковых колебаний и, следовательно, величину деформации выводов в местах присоединения [10]. Это позволяет повысить воспроизводимость качества сварки, поскольку чрезмерная деформация вывода приводит к снижению прочности сварного соединения.

Сварку микросхем проводят с использованием специальных столиков, обеспечивающих фиксацию и необходимую точность совмещения выводов ГПН с контактными площадками кристаллов по двум взаимно перпендикулярным осям и по углу.

После защиты мест сварки полимерным компаундом микросхемы загружаются в тару-спутник (рис. 5). Тип тары-спутника выбирается в зависимости от количества выводов и размеров носителя. При трехстороннем размещении контактных площадок можно применять стандартную тару-спутник, используемую для микросхем с количеством выводов до 64, доработав ее под размеры конкретного кристалла СБИС. После размещения СБИС тара-спутник закрывается крышкой с отверстиями для зондов контактирующих устройств. Затем загруженные микросхемы помещают в контактирующее устройство, соединенное с измерительным устройством, и проводят измерение их параметров.

Перед установкой на керамическую плату годные микросхемы извлекают из тары-спутника. С помощью специального инструмента с острой режущей кромкой под микроскопом на них отделяют технологические зоны (периферийную и контактирования). Затем микросхемы приклеивают к керамической плате с помощью кремнийорганического компаунда, после чего внешние выводы приваривают к металлизированным контактным площадкам этой же платы. Впоследствии таким же методом к керамической плате привариваются промежуточные электроды для подачи высокого напряжения к МКП.

Более детально процесс монтажа МКЧД однокристалльной конструкции описан в [1]. На рис. 6 приведена фотография такого МКЧД в сборе.

Разработанные кристаллы СБИС [4] рассчитаны на возможность создания нового поколения детекторов, в том числе многокристалльных, с использованием соответствующих ми-

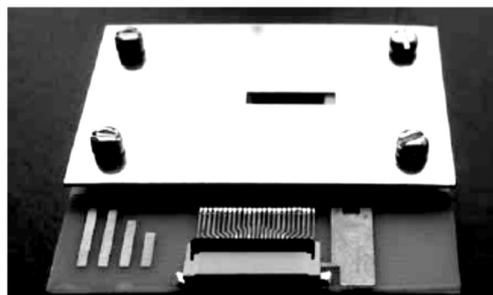


Рис. 6. Однокристалльный микроэлектронный координатно-чувствительный детектор в сборе [1]

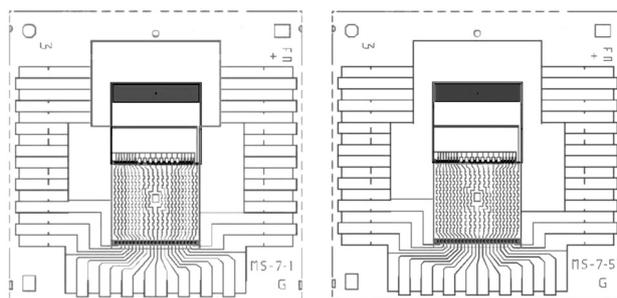


Рис. 7. Конструкция гибких носителей для спектрометра (слева — с одним измерительным кристаллом, справа — с пятью)

кроканальных пластин. При использовании двух МКП Hamamatsu F4772-01 и пяти таких СБИС предполагается реализовать координатно-чувствительный детектор с длиной фокальной плоскости магнитного анализатора 5 см, увеличив до 1920 число каналов, одновременно участвующих в анализе. Для создания таких приборов разработаны новые кристаллы СБИС [4] и конструкции гибкого носителя (рис. 7), в том числе конструктивный вариант, позволяющий размещать линейку из пяти кристаллов на керамическом основании с минимально возможным зазором между ними — не более 100 мкм.

Монтаж МКЧД с пятью измерительными кристаллами предполагается проводить по вышеописанной технологии путем последовательной ультразвуковой сварки кристаллов СБИС на керамическую плату, затем будут монтироваться промежуточные электроды, МКП, общая прижимная рамка и экран.

### Выводы

В результате проведенного анализа для сборки микроэлектронного координатно-чувствительного детектора выбрана технология сборки на гибком носителе типа «алюминий — полиимид», которая обеспечивает высокую надежность

изделий и применяется при изготовлении микроэлектронной аппаратуры специального назначения, в том числе стойкой к специальным внешним воздействующим факторам. Многолетний опыт эксплуатации МКЧД в Институте прикладной физики НАНУ, г. Сумы, подтверждает их высокие эксплуатационные характеристики.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сидоренко В. П., Прокофьев Ю. В., Мурченко Д. С. и др. Координатно-чувствительный детектор заряженных частиц для спектроскопии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2016. — № 4. — С. 53–60. — <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2016.4-5.53>

2. Сидоренко В. П., Вербицкий В. Г., Прокофьев Ю. В. и др. СБИС для микроэлектронного координатно-чувствительного детектора приборов элементного анализа материалов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 2. — С. 25–29.

3. Сидоренко В. П., Вербицкий В. Г., Прокофьев Ю. В. Схемотехника СБИС для микроэлектронного координатно-чувствительного детектора для элементного анализа материалов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 4. — С. 39–46.

4. Сидоренко В. П., Радкевич А. И., Прокофьев Ю. В. и др. СБИС для микроэлектронного координатно-чувствительного детектора нового поколения с расширенным полем анализа для масс-спектрометрии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2018. —

№1. — С. 13–20. — <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2016.1.13>

5. Медведев А. М. Сборка и монтаж электронных устройств. — Москва: Техносфера, 2007.

6. Воженин И. Н., Блинов Г. А., Коледов Л. А. и др. Микроэлектронная аппаратура на бескорпусных интегральных микросхемах. — Москва: Радио и связь, 1985.

7. Вербицкий В. Г., Плис Н. И., Жора В. Д., Грунянская В. П. Сравнительный анализ методов сборки микросхем на гибких полиимидных носителях // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2013. — № 5. — С. 37–41.

8. Перевертайло В. Л., Жора В. Д., Грунянская В. П. и др. Применение гибких носителей при сборке кремниевых детекторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 1. — С. 40–44.

9. Боршев В. Н., Антонова В. А., Листратенко А. М. и др. Комплексный подход к выбору конструктивно-технологических решений гибко-жестких однодетекторных модулей для комптоновской медицинской томографии // Сцинтилляционные материалы. Инженерия, устройства, применение: сб. статей. — Харьков: ИСМА, 2009. — С. 111–127. [Borshchev V. N., Antonova V. A., Listratenko A. M. et al.]

10. Плис Н. И., Вербицкий В. Г., Жора В. Д. и др. Технология сборки микросхем на гибком полиимидном носителе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010. — № 5–6. — С. 43–45.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 27.12 2017 г.

В. П. СИДОРЕНКО, В. Д. ЖОРА, О. І. РАДКЕВИЧ, В. П. ГРУНЯНСЬКА,  
Ю. В. ПРОКОФ'ЄВ, Ю. В. ТАЯКІН, Т. М. ВІРОЗУБ

Україна, м. Київ, НДІ мікроприладів НТК «ІМК» НАН України  
E-mail: vdzhora@gmail.com

## ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ СКЛАДАННЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ КООРДИНАТНО-ЧУТЛИВИХ ДЕТЕКТОРІВ

*Розглянуто особливості конструкції та технології складання мікроелектронних координатно-чутливих детекторів заряджених частинок для спектроскопії. Основою приладу є кристал спеціалізованої надвеликої інтегральної схеми (НВІС), що виготовляється по КМОН-технології і містить зарядочутливу матрицю, призначену для детектування іонів ізотопів елементів у широкому спектрі мас досліджуваної речовини. Діапазон концентрацій, вимірюваних приладом, також є широким і складає від  $10^{-7}$  до 100%. Кристал НВІС розміщується на багатощаровій керамічній основі. Прилад містить також мікроканалну пластину (МКП) фірми Hamamatsu (Японія), електроди для підводу до МКП високої напруги (2,0 кВ), немагнітний металевий екран для захисту елементів конструкції приладу, роз'єм та інші конструктивні елементи.*

*Монтаж кристалів НВІС проводиться з використанням методу складання (ультразвукового зварювання) микросхем на гнучких носіях типу «алюміній — поліїмід», який має ряд переваг у порівнянні з іншими методами монтажу. Кристали НВІС з проектними нормами 1 мкм розраховані на створення нового покоління детекторів, що можуть містити як один кристал, так і декілька. Розроблено конструктивний варіант гнучкого носія, що дозволяє розміщувати лінійку з п'яти кристалів на керамічній основі з мінімальним зазором не більше 100 мкм між ними. Дана конструкція забезпечує високу надійність виробів завдяки застосуванню багатощарових керамічних плат і прогресивних методів складання, що використовуються при виготовленні мікроелектронної апаратури спеціального призначення, в тому числі стійкої до впливу спеціальних зовнішніх факторів.*

*Ключові слова: мікроелектронний координатно-чутливий детектор, спеціалізована НВІС, гнучкий поліїмідний носій, ультразвук зварка.*

DOI: 10.15222/TKEA2018.1.21  
UDC 539.1.074

V. P. SIDORENKO, V. D. ZHORA,  
O. I. RADKEVICH, V. P. GRUNYANSKA,  
Yu. V. PROKOFIEV, Yu. V. TAYAKIN, T. M. VIROZUB

Ukraine, Kyiv, State enterprise "RI of Microdevices"  
STS "Institute of Single Crystals" NAS of Ukraine

E-mail: vdzhora@gmail.com

## ASSEMBLY TECHNOLOGY AND DESIGN FEATURES OF MICROELECTRONIC COORDINATE-SENSITIVE DETECTORS

*The design features and assembly technology of microelectronic coordinate-sensitive detectors of charged particles for spectroscopy are considered. The device is based on the specialized very-large-scale integration (VLSI) crystal manufactured using CMOS technology and containing a charge-sensitive matrix designed to detect isotope ions in a wide mass spectrum of the test substance. The range of concentrations measured by devices is also wide and ranges from  $10^{-7}$  to 100%. The VLSI crystal is placed on a multilayer ceramic basis. The devices also contain a Hamamatsu micro-channel plate (MCP), electrodes that supply high voltage to integrated circuits (2.0 kV), a non-magnetic metal shield for protecting the device components, a connector and other structural elements.*

*VLSI crystals are installed using the method of laying the microcircuits on a flexible aluminum – polyimide media. Such mounting method has a number of advantages over others. The VLSI crystals with project standards of 1  $\mu\text{m}$  are designed for the possibility to create new generation of detectors, which can include either one or several crystals. The prototype version has been developed and it allows placing a bar of five ceramic-based crystals with a minimum gap of 100  $\mu\text{m}$  between them. This design provides high reliability of products due to the usage of multilayer ceramic boards and due to progressive assembly methods used in the manufacturing of special-purpose microelectronic equipment, including the equipment resistant to special external factors.*

*Key words: microelectronic coordinate-sensitive detector, specialized VLSI, flexible polyimide carrier, ultrasonic welding.*

### REFERENCES

1. Sidorenko V.P., Prokofiev Yu.V., Murchenko D.S., Yeremenko V.M., Shelehov A.V. Coordinate-sensitive charged particle detector for spectroscopy. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2016, no. 4, pp. 53-60. (Rus). <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2016.4-5.53>
2. Sidorenko V. P., Verbitskiy V. G., Prokofiev Yu. V., Kyziak A. Yu., Nikolayenko Yu. E. VLSI for a microelectronic coordinate-sensitive detector of material analysis instruments. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2009, no. 2, pp. 25-29. (Rus)
3. Sidorenko V. P., Verbitskiy V. G., Prokofiev Yu.V. VLSI circuitry for a microelectronic coordinate-sensitive detector for elemental analysis of materials. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2012, no. 4, pp. 39-46. (Rus)
4. Sidorenko V.P., Radkevich O.I., Prokofiev Yu.V et al. VLSI for a new generation of microelectronic coordinate-sensitive detectors with an extended field of analysis for use in mass spectrometry. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 1, pp. 13-20. (Rus). <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.1.13>
5. Medvedev A.M. *Sborka i montazh elektronnykh ustroystv* [Assembly and installation of electronic devices]. Moscow, Tekhnosfera, 2007, 256 p. (Rus).
6. Vozhenin I. N., Blinov G. A., Koledov L. A. et al. *Mikroelektronnaya apparatura na beskorpusnykh integral'nykh mikroskhemakh* [Microelectronic equipment on open-frame integrated microcircuits]. Moscow, Radio y svyaz', 1985, 264 p. (Rus)
7. Verbitskiy V. G., Plis N. I., Zhora V. D., Grunyanakaya V. P. Comparative analysis of methods for the microcircuit assembly on flexible polyimide carriers. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2013, no. 5, pp. 37-41. (Rus)
8. Perevertaylo V. L., Zhora V. D., Grunyanakaya V. P., Pugatch V. M., Tuchynsky I. A., Shkirenko E. A. Usage of flexible carrier at assembling of silicon detectors. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2009, no. 1, pp. 40-44. (Rus)
9. Borshchev V. N., Antonova V. A., Listratenko A. M. et al. [A comprehensive approach to the selection of design and technological solutions for flexible-rigid single-detector modules for Compton medical tomography]. *Stintillyatsionnye materialy. Inzheneriya, ustroystva, primeneniye*, Kharkiv, ISMA, 2009, pp. 111-127. (Rus)
10. Plis N. I., Verbitskiy V. G., Zhora V. D. et al. The technology of assembly of microcircuits on a flexible polyimide carrier. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2010, no. 5-6, pp. 43-45. (Rus)

К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, Е. К. КОШЕЛЕВ, В. И. БОНДАР

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: koa@onu.ua

## БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ И КАДРОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В МОДЕМАХ С QPSK-МОДУЛЯЦИЕЙ

*Предложен вариант технической реализации быстродействующего алгоритма восстановления несущей частоты методом непосредственной подстройки фазы опорного генератора с одновременным устранением неоднозначности фазы и выделением кадровой синхронизации в QPSK-модеме при использовании согласованных фильтров с последовательностями Баркера длиной 7.*

*Ключевые слова:* QPSK-модем, согласованный фильтр, блок синхронизации, неоднозначность фазы, код Баркера.

Квадратурная фазовая манипуляция QPSK (quadrature phase shift keying) является одним из самых распространенных видов цифровой модуляции, она обеспечивает высокую помехоустойчивость и имеет относительно простую схему модулятора и демодулятора [1, 2].

Среди основных задач, возникающих при демодуляции QPSK [3–5], можно выделить проблему устранения неоднозначности фазы при восстановлении несущей частоты и обеспечение надежной кадровой синхронизации при заданной помехоустойчивости. Кроме того, при работе модема от автономного источника питания появляются дополнительные требования по снижению времени вхождения в синхронизм модулятора и демодулятора, связанные с обеспечением энергетической эффективности.

Задачи восстановления несущей частоты и восстановления синхронизации в существующих устройствах разделяются и решаются с помощью разных функциональных модулей, что не является оптимальным с точки зрения энергетической эффективности.

В настоящей работе предложена модернизация алгоритма работы блоков кадровой синхронизации и восстановления несущей частоты QPSK-модема для обеспечения высокого быстродействия при простоте схемной реализации.

Графическое представление QPSK-модуляции в виде сигнального созвездия представлено на рис. 1. Каждая сигнальная точка имеет свой номер (I–IV) и кодируется парой квадратур  $I$ ,  $Q$ , которые могут принимать значения  $\pm 1$  на выходе фильтров низкой частоты (ФНЧ) с полосой Найквиста.

Для восстановления опорного колебания обычно применяются два основных подхода.

Первый заключается в снятии модуляции путем умножения частоты входного сигнала на  $M$  (число позиций фазы сигнала) и последующим делением на то же число. Второй подход состоит в подстройке частоты опорного генератора с помощью фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ).

Схему ФАПЧ, которая в литературе известна под названием «петля Костаса» [2] (рис. 2), проще реализовать в интегральном исполнении, чем схему умножения частоты. В каждую ветвь такой схемы включен регенератор и дополнительный перемножитель. Два других перемножителя выполняют перемножение выходных напряжений синфазного и квадратурного каналов, а их выходные напряжения складываются в противофазе в сумматоре. В результате такой обработки напряжение на выходе сумматора оказывается немодулированным и служит для управления фазой опорного генератора. При этом синфазный и квадратурный кана-

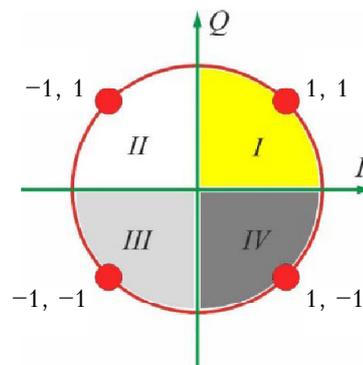


Рис. 1. Плоскость сигнального созвездия QPSK

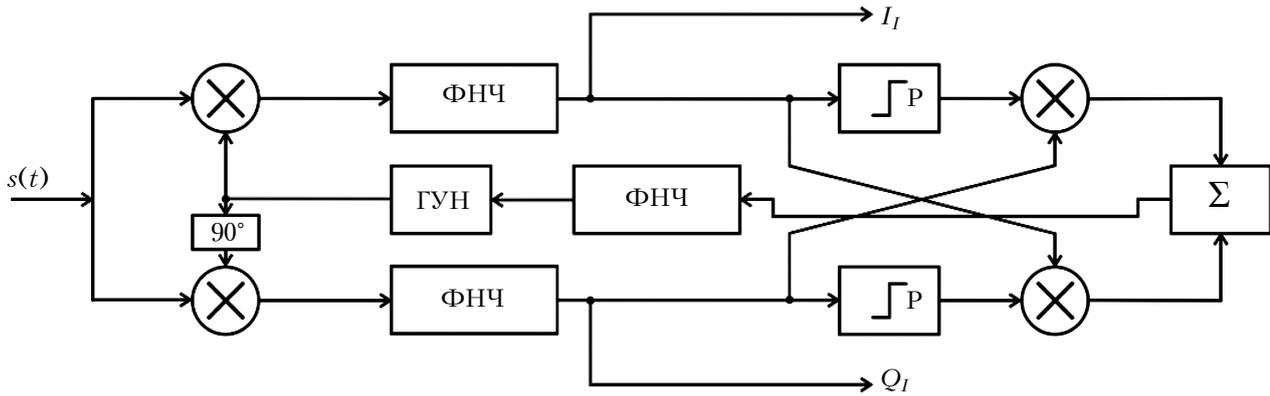


Рис. 2. Структурная схема восстановления несущей для QPSK-сигнала на основе петли Костаса:

ГУН – генератор, управляемый напряжением; Р – регенератор;  $s(t)$  – входной сигнал с QPSK-модуляцией

лы должны иметь одинаковые импульсные характеристики и величину задержки.

Очевидно, что на выходе ГУН в схеме рис. 2 присутствует неоднозначность фазы, составляющая  $360^\circ/M$ . Для QPSK она равна  $90^\circ$  (поскольку  $M = 4$ ), что делает необходимым предварительное дифференциальное кодирование на передаче и дифференциальное декодирование после демодуляции на приеме [6]. Другими словами, в сигнале с относительным кодированием исходная цифровая информация заключается не в значении символа, а в изменении этого значения.

С целью повышения эффективности системы связи с QPSK-модуляцией, работающей в импульсном режиме, предлагается следующий алгоритм, быстродействие которого выше, чем у петли Костаса.

**Шаг 1.** Вычисление модуля значений квадратур.

**Шаг 2.** Вычисление фазового сдвига плоскости сигнального созвездия относительно фазы опорного генератора с помощью функции  $\arctg$ .

**Шаг 3.** Вычисление разности фаз между требуемым и текущим значением положения точек сигнального созвездия.

**Шаг 4.** Формирование управляющего сигнала для регулируемого фазовращателя в соответствии с разностью фаз, вычисленной на шаге 3.

Практическая реализация предложенного алгоритма в виде схемы восстановления несущей частоты  $f_{out}$  приведена на рис. 3. Схема содержит два балансных умножителя, фильтры низкой частоты с амплитудно-частотной характеристикой «приподнятый косинус» (Найквиста) для устранения межсимвольной интерференции, блоки вычисления модуля квадратуры ( $|X|$ ), нерегулируемый стабильный кварцевый генератор, блок вычисления арктангенса и управляемый фазовращатель. Подстройка положения точки сигнального созвездия происходит за счет регулировки фазы выходного сигнала стабильного кварцевого генератора с помощью регулируемого фазовращателя. Необходимый фазовый сдвиг вычисляется как арктангенс отношения модулей напряжений квадратур. Вычисленное

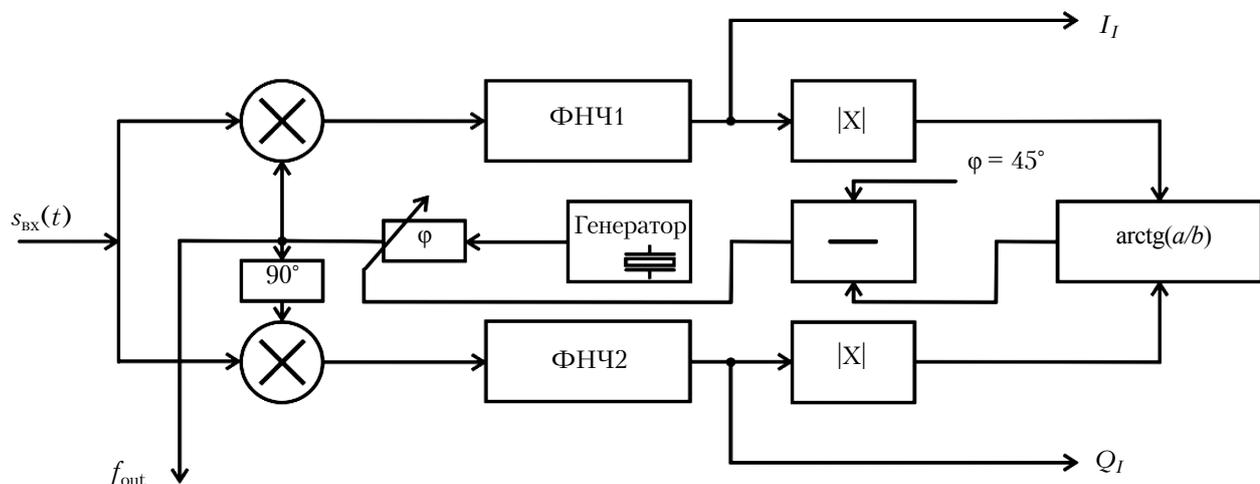


Рис. 3. Структурная схема восстановления несущей для QPSK-сигнала с регулируемым фазовращателем

значение вычитается из  $45^\circ$ , поскольку реальное значение точек созвездия соответствует  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  и  $315^\circ$ .

Нетрудно заметить, что данная схема сводит вычисления всех углов к анализу 1-й четверти, а критерием правильной настройки является равенство модулей квадратур  $|I| = |Q|$ . Таким образом, нулевой фазовый сдвиг регулируемого фазовращателя соответствует  $45^\circ$  ( $\arctg 1 = 45^\circ$ ), а при невыполнении этого условия происходит компенсация фазы генератора на требуемый угол.

Схема восстановления несущей частоты на рис. 3 имеет, как и «петля Костаса», неоднозначность фазы, кратную  $90^\circ$ .

Для комплексного решения задачи восстановления фазы несущей частоты, а также выделения цикловой и битовой синхронизации необходимо выбрать синхропоследовательности с определенными свойствами, а именно:

- уровень боковых лепестков непериодической автокорреляционной функции (**НАКФ**) синхропоследовательности должен быть минимальным;

- последовательность не должна обладать свойством поворотной симметрии при фазовом сдвиге сигнального созвездия на угол, кратный  $90^\circ$ ;

- для восстановления битовой синхронизации синхрокod должен обеспечивать как можно большее число перескоков фазы или переходов сигнальной точки созвездия QPSK из одной четверти в другую;

- для устойчивости расположения сигнальных точек созвездия QPSK относительно осей  $I$ ,  $Q$  необходимо, чтобы за время передачи одного синхрокода выполнялся «обход» всех четырех четвертей.

Всем перечисленным требованиям удовлетворяют последовательности Баркера.

В квадратурных каналах должны использоваться последовательности одинаковой длины, поскольку каждая сигнальная точка представляется парой квадратур. При использовании кода Баркера длиной 7 возможны три варианта записи: прямой, инверсный и «зеркальный». Форма огибающей данных кодов, обеспечивающих наилучшую АКФ, показана на рис. 4.

Возможные варианты реализации синхросигнала по квадратурам  $I$ ,  $Q$  в этом случае приведены в табл. 1.

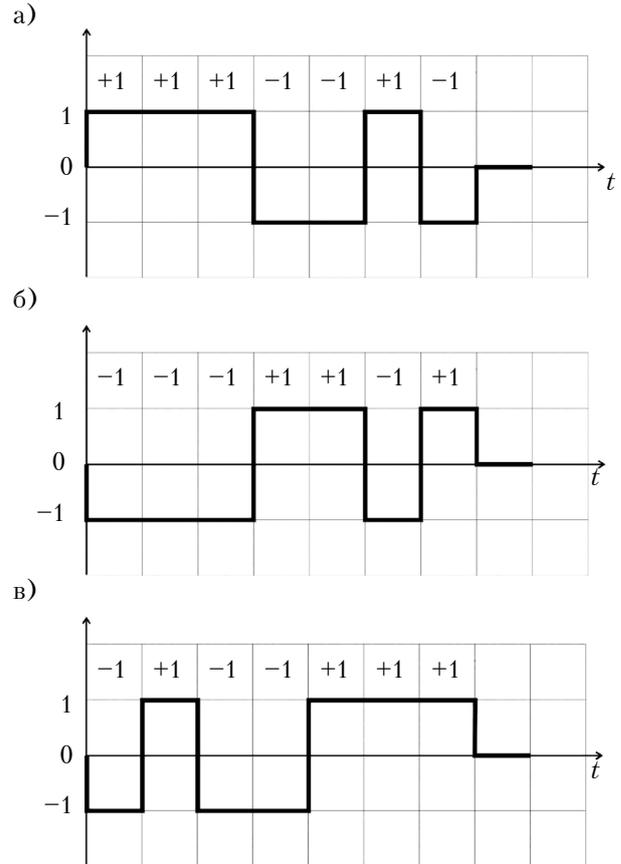


Рис. 4. Прямой (а), инверсный (б) и «зеркальный» (в) коды Баркера длиной 7

Из приведенных в табл. 1 данных следует очевидный вывод, что наилучшим для использования является сочетание прямого (инверсного) кода Баркера, передаваемого по квадратуре  $I$ , и зеркального, передаваемого по квадратуре  $Q$ . В этом случае сигнальная точка обходит все че-

Таблица 1

Варианты реализации синхросигнала по квадратурам  $I$ ,  $Q$

$I$	$Q$	$I_0$ $Q_0$	$I_1$ $Q_1$	$I_2$ $Q_2$	$I_3$ $Q_3$	$I_4$ $Q_4$	$I_5$ $Q_5$	$I_6$ $Q_6$	Переходы по четвертям	$k$
П	П	1 1	1 1	1 1	-1 -1	-1 -1	1 1	-1 -1	I → I → I → III → III → I → III	2
П	И	1 -1	1 -1	1 -1	-1 1	-1 1	1 -1	-1 1	IV → IV → IV → II → II → IV → II	2
П	З	1 -1	1 1	1 -1	-1 -1	-1 1	1 1	-1 1	IV → I → IV → III → II → I → II	4
И	И	-1 -1	-1 -1	-1 -1	1 1	1 1	-1 -1	1 1	III → III → III → I → I → III → I	2
И	З	-1 -1	-1 1	-1 -1	1 -1	1 1	-1 1	1 1	III → II → III → IV → I → II → I	4
З	З	-1 -1	1 1	-1 -1	-1 -1	1 1	1 1	1 1	III → I → III → III → I → I → I	2

Примечания: П – прямой; И – инверсный; З – зеркальный;  $k$  – количество четвертей, занимаемых сигнальной точкой за время передачи 1-го синхрокода

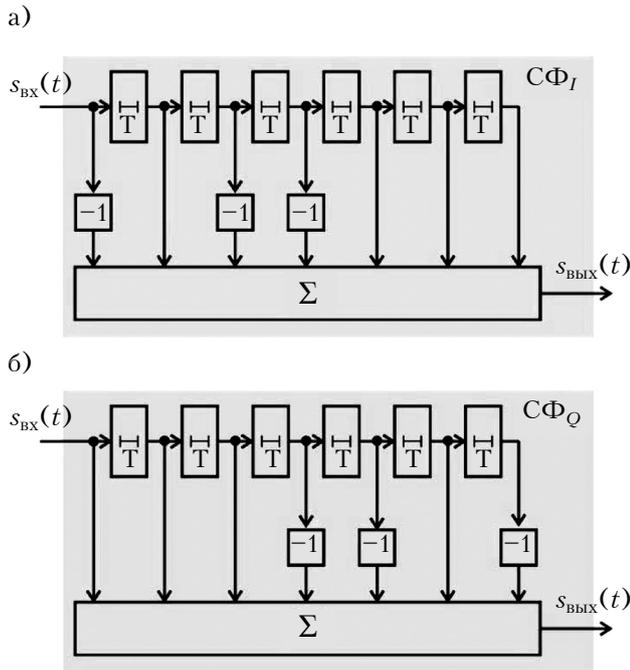


Рис. 5. Структурная схема согласованных фильтров для прямого (а) и зеркального (б) кодов Баркера (Т — линия задержки на такт; -1 — инвертор уровня сигнала)

тыре позиции сигнального созвездия, при этом обеспечивается наибольшее количество скачков фазы, равное 6.

Структурные схемы согласованных по низкой частоте согласованных фильтров (СФ) с прямым и зеркальным кодами Баркера для квадратур  $I$  и  $Q$  приведены на рис. 5. Их аппаратная реализация достаточно проста, поскольку в отводах линий задержек вместо умножителей используются инверторы уровней сигнала.

С учетом выбранных типов синхросигналов и соответствующих фильтров функциональная схема восстановления несущей частоты и выделения кадровой синхронизации имеет вид, представленный на рис. 6.

Принцип действия демодулятора следующий. Синхропоследовательности, представляющие собой коды Баркера, выделяются из информационного сообщения с помощью согласованных фильтров, работающих синхронно на низкой частоте  $f_{\text{симв}}$ . Поскольку с помощью блока восстановления несущей частоты ее фаза может восстанавливаться с точностью, кратной  $90^\circ$ , схема содержит четыре идентичных канала, настроенных на четыре возможных реализации поворота плоскости сигнального созвездия. Реализация относительного поворота сигнального созвездия входного сигнала на  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $270^\circ$  осуществляется с помощью блоков функционального преобразования

(ротаторов) путем доворота на 1, 2, 3 четверти против часовой стрелки. На вход ротатора поступают низкочастотные сигналы квадратур  $I_{\text{in}}$ ,  $Q_{\text{in}}$  с выхода аналоговых низкочастотных фильтров (фильтров Найквиста), устраняющих межсимвольную интерференцию. Преобразованные сигналы квадратур  $I_{\text{out}}$ ,  $Q_{\text{out}}$  с выхода каждого функционального преобразователя поступают на идентичные пары согласованных фильтров (СФ<sub>I</sub>, СФ<sub>Q</sub>) и далее — на пороговые решающие устройства (РУ<sub>I</sub>, РУ<sub>Q</sub>) с порогом  $Z$ . Выходы решающих устройств для каждой пары  $I$ ,  $Q$  подключены к схеме «И», на выходе которой возникает видеоимпульс в момент совпадения максимальных откликов на выходах одной из пар СФ. Кадровый синхроимпульс формируется с помощью четырехходовой схемы «ИЛИ», входы которой подключены к выходам схем «И».

Дешифратор выполняет функцию выбора правильного расположения пары  $I$ ,  $Q$ . Для этого он содержит сумматор, осуществляющий поворот плоскости сигнального созвездия (см. рис. 1) в зависимости от номера канала, в котором произошло превышение порога.

Таблицы истинности всех функциональных преобразователей приведены в табл. 2.

Проведем анализ работы схемы, изображенной на рис. 6, при всех возможных значениях угла поворота плоскости сигнального созвездия.

При любом повороте плоскости сигнального созвездия, кратном  $90^\circ$ , на выходах СФ одного из каналов формируется отклик в виде НАКФ, а на выходах фильтров остальных трех каналов формируются отклики в виде взаимнокорреляционной функции между исходной последовательностью и ее аффинным сдвигом. При этом под аффинным сдвигом понимается последовательность, полученная в результате смеще-

Таблица 2  
Таблицы истинности функционального преобразователя

$I_{\text{in}}$	$Q_{\text{in}}$	Выходной сигнал блока ротатора при довороте против часовой стрелки на угол					
		$90^\circ$		$180^\circ$		$270^\circ$	
		$I_{\text{out}}$	$Q_{\text{out}}$	$I_{\text{out}}$	$Q_{\text{out}}$	$I_{\text{out}}$	$Q_{\text{out}}$
-1	-1	1	-1	1	1	-1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
1	1	-1	1	-1	-1	1	-1

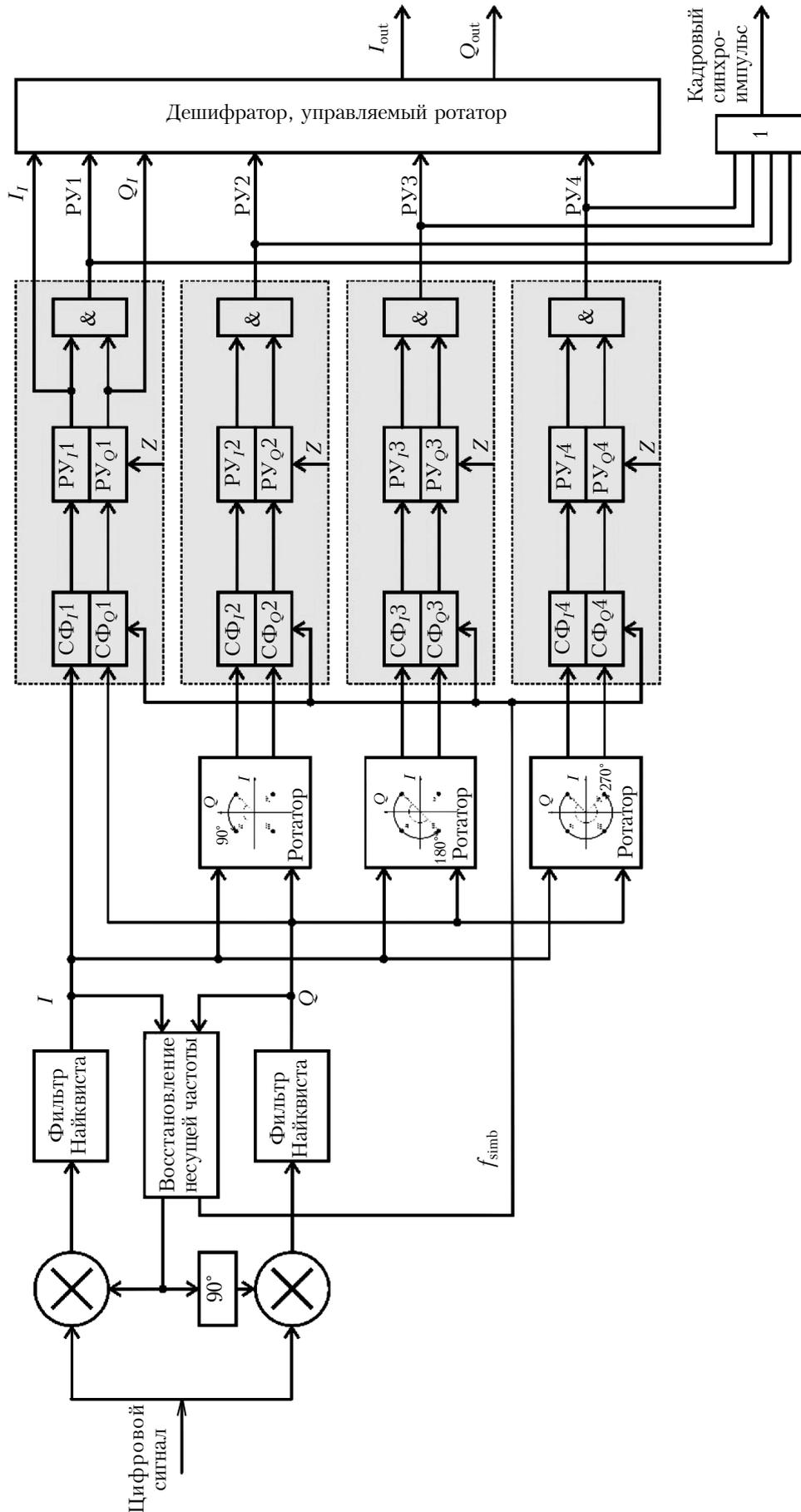
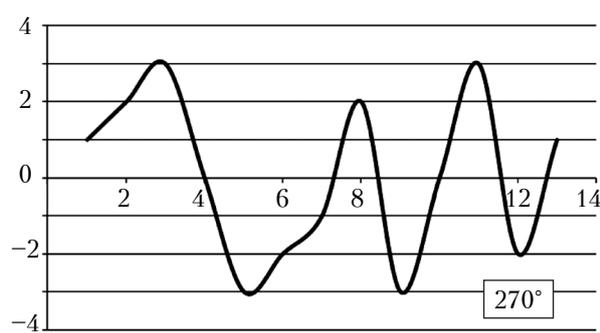
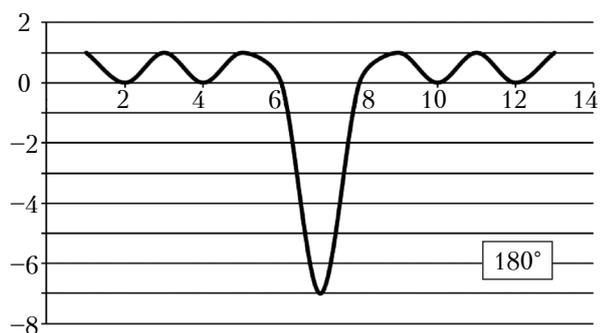
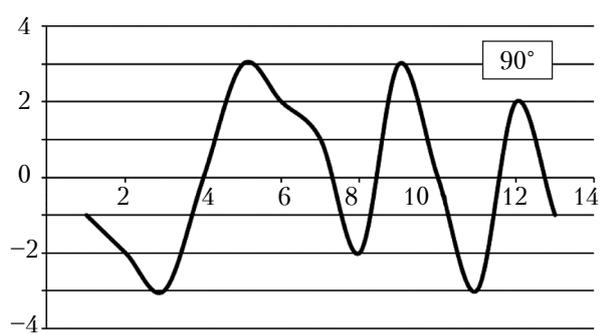
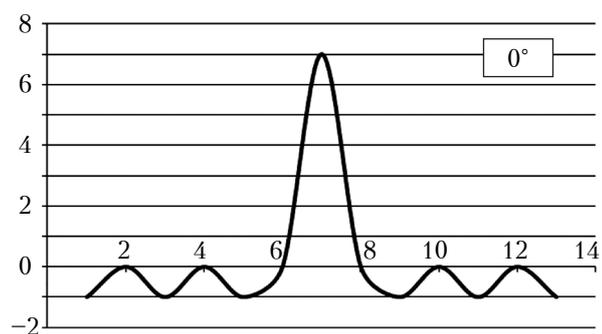


Рис. 6. Функциональная схема восстановления несущей частоты и выделения кадровый синхронизации

а)



б)

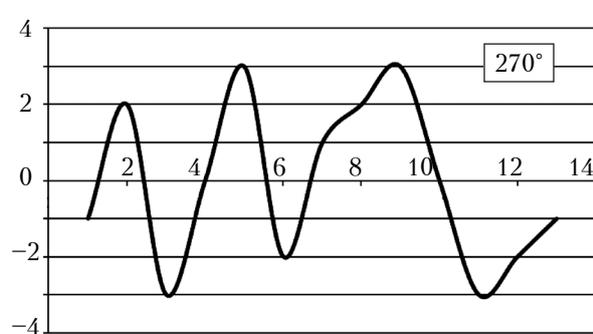
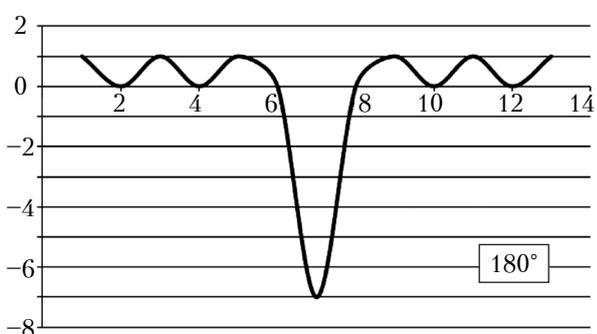
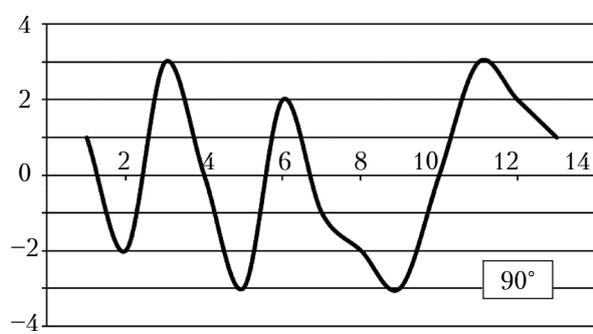
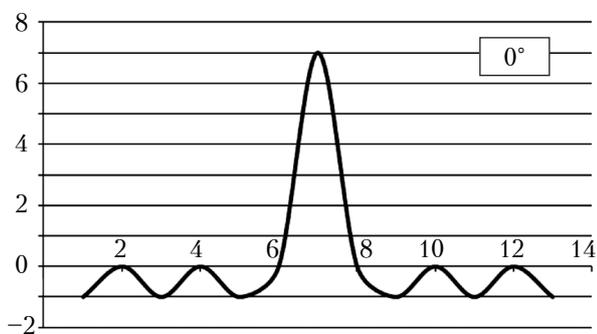


Рис. 7. Отклики на выходах СФ по  $I$ -кватртуре (а) и  $Q$ -кватртуре (б) при различных значениях угла поворота плоскости сигнального созвездия

Таблица 3  
Переходы сигнальных точек при различных значениях начальной фазы синхросигнала

Угол поворота	$I_0$ $Q_0$	$I_1$ $Q_1$	$I_2$ $Q_2$	$I_3$ $Q_3$	$I_4$ $Q_4$	$I_5$ $Q_5$	$I_6$ $Q_6$	Переходы по четвертям
$0^\circ$	1 -1	1 1	1 -1	-1 -1	-1 1	1 1	-1 1	IV→I→ IV→III→ II→I→II
$90^\circ$	1 1	-1 1	1 1	1 -1	-1 -1	-1 1	-1 -1	I→II→I→ IV→ III→II→ III
$180^\circ$	-1 1	-1 -1	-1 1	1 1	1 -1	-1 -1	1 -1	II→III→ II→I→ IV→III→ IV
$270^\circ$	-1 -1	1 -1	-1 -1	-1 1	1 1	1 -1	1 1	III→IV→ III→II→ I→IV→I

ния начальной позиции сигнальной точки в другую четверть плоскости сигнального созвездия.

Отклики на выходах СФ одного их каналов при всех возможных начальных фазах синхросигнала по квадратурам  $I$ ,  $Q$  приведены на рис. 7, а переходы сигнальных точек при различных начальных фазах синхросигнала показаны в табл. 3. Анализ сигнала на выходе согласованных фильтров показывает отсутствие поворотной симметрии и подтверждает целесообразность применения последовательностей Баркера длиной 7.

### Выводы

Таким образом, исследования показали, что предложенный комбинированный алгоритм восстановления фазы несущей частоты и выделения кадровой синхронизации позволяет сократить время входа в синхронизм, делая его соизме-

римым с длительностью одного QPSK-символа. Необходимо также отметить, что это время не зависит от разности фаз принятого и исходного сигнального созвездия, а схемная реализация неперестраиваемого генератора существенно проще, чем используемая обычно реализация генератора, управляемого напряжением. Помехоустойчивость предложенной схемы синхронизации, благодаря использованию сигнально-кодовой конструкции на основе последовательностей Баркера длиной 7 с согласованной обработкой, также будет выше, чем при использовании в составе QPSK-модема «петли Костаса» с дифференциальным кодированием.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шевкопляс Б. В., Сухман С. М., Бернов А. В. Синхронизация в телекоммуникационных системах. Анализ инженерных решений. — Москва: Эко-Трендз, 2003.
2. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи. — Москва: Мир, 2003.
3. Садченко А.В., Кушниренко О.А., Ефимов О.И. и др. Корреляционная схема кадровой синхронизации в системах связи с QPSK-модуляцией // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2017. — № 6. — С. 22–28. — <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.6.22>
4. Sadchenko A.V., Kushnirenko O.A., Troyansky A.V. The algorithm of random length sequences synthesis for frame synchronization of digital television systems // Праці Одеського політехнічного університету. — 2015. — Вип. 3(47). — С. 97–103. — <http://dx.doi.org/10.15276/oru.3.47.2015.14>
5. Садченко А.В., Аверочкин В.А., Кушниренко О.А. Повышение надежности синхронизации систем связи с кодовым разделением каналов // Труды 12-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, Одесса. — 2011. — С. 191.
6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. — Москва: Издательский дом «Вильямс», 2003.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 30.01 2018 г.

А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, Є. К. КОШЕЛЕВ, В. І. БОНДАР

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: koa@oru.ua

## ШВИДКОДІЮЧИЙ АЛГОРИТМ ВІДНОВЛЕННЯ НЕСУЧОЇ ЧАСТОТИ І КАДРОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ У МОДЕМАХ З QPSK-МОДУЛЯЦІЄЮ

У системах зв'язку з QPSK-модуляцією, що працюють в імпульсному режимі, при демодуляції сигналів виникає проблема швидкого усунення неоднозначності фази опорного генератора і забезпечення надійної кадркової синхронізації при заданій завадостійкості. У більшості QPSK-модемів завдання відновлення несучої частоти і відновлення синхронізації поділяються і вирішуються за допомогою різних функціональних модулів, що не є оптимальним рішенням за критерієм підвищення енергетичної ефективності.

У даній роботі запропоновано алгоритм кадркової синхронізації і відновлення несучої частоти QPSK-модему, який має високу швидкість завдяки використанню послідовностей Баркера як синхросигналів у сукупності з узгодженою обробкою.

Проведено моделювання роботи комбінованої схеми, що дозволяє усунути неоднозначність фази опорного коливання з одночасним формуванням сигналу кадрової синхронізації при різних комбінаціях бінарних синхрокодів довжиною  $N = 7$ .

Для отримання опорного коливання використано стабільний кварцовий генератор, фаза якого змінюється стрибком за допомогою блоку зовнішнього регульованого фазообертача, а неоднозначність фази, яка є кратною  $90^\circ$ , усувається завдяки проведенню паралельного аналізу всіх можливих кутів повороту площини сигнального сузір'я в блоках, що містять пару фільтрів, узгоджених з сигналом, розподіленим по двох квадратах.

Час входу в синхронізм для запропонованої схеми не залежить від початкової різниці фаз прийнятого та вихідного сигнального сузір'я, при цьому схемна реалізація неперебудовуваного генератора істотно простіше за реалізацію генератора, керуваного напругою.

Ключові слова: QPSK-модем, узгоджений фільтр, блок синхронізації, неоднозначність фази, код Баркера.

DOI: 10.15222/TKEA2018.1.28  
UDC 621.396.66

A. V. SADCHENKO, O. A. KUSHNIRENKO,  
E. K. KOSHELEV, V. I. BONDAR

Ukraine, Odesa National Polytechnic University  
E-mail: koa@opu.ua

## HIGH-SPEED ALGORITHM FOR CARRIER FREQUENCY RECOVERY AND FRAME SYNCHRONIZATION IN QPSK-MODULATED MODEMS

When demodulating signals in communication systems with QPSK modulation operating in the pulsed mode, the following problems arise: rapid elimination of the reference oscillator phase ambiguity and ensuring reliable frame synchronization for a given noise immunity. In most QPSK modems, the carrier frequency recovery and synchronization recovery tasks are separated and solved with the help of different functional modules, which is not the optimal solution from the point of view of increasing the energy efficiency.

In this paper, we propose a fast algorithm for frame synchronization and recovery of the carrier frequency of a QPSK modem using Barker sequences as synchronization signals in conjunction with the coordinated processing.

The simulation of the combined circuit is performed, which allows to eliminate the phase ambiguity of the reference oscillation with the simultaneous formation of the frame synchronization signal for various combinations of binary sync codes of the length  $N = 7$ .

To obtain a reference oscillation, a stable quartz oscillator is used. An external adjustable phase shifter block abruptly changes the phase of the oscillator, and the phase ambiguity, which is multiple of  $90^\circ$ , is eliminated by parallel analysis of all possible rotations of the signal constellation plane in the units, each of which contains a pair of filters matched to the signal distributed over in two quadratures.

The timing for the proposed scheme does not depend on the initial phase difference between the received and the initial signal constellations, while the circuit realization of a non-tunable oscillator is much simpler than that for a voltage controlled oscillator.

Keywords: QPSK-modem, matched filter, synchronization unit, phase ambiguity, Barker code.

### REFERENCES

1. Shevkoplyas B.V., Sukhman S.M., Bernov A.V. *Sinkhronizatsiya v telekommunikatsionnykh sistemakh. Analiz inzhenernykh reshenii* [Synchronization in telecommunication systems. Analysis of engineering solutions]. Moscow, Eko-Trends, 2003, 272 p. (Rus)
2. Breni S. *Sinkhronizatsiya tsifrovyykh setei svyazi* [Synchronization of digital communication networks]. Moscow, Mir, 2003, 418 p.
3. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Yefimov O. I., Punko V. V., Parovyi S. Y. Correlation scheme of frame synchronization in communication systems with QPSK-modulation. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy*

*Apparature*, 2017, no. 6, pp. 22-28. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.6.22>

4. Sadchenko A.V., Kushnirenko O.A., Troyansky A.V. The algorithm of random length sequences synthesis for frame synchronization of digital television systems. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, 2015, iss. 3(47), pp. 97-103. <http://dx.doi.org/10.15276/opu.3.47.2015.14>

5. Sadchenko A.V., Averochkin V.A., Kushnirenko O.A. *Proc. of 12<sup>th</sup> ISPC "Modern Information and Electronic Technologies"*, Ukraine, Odesa, 2011, p. 191. (Rus)

6. Sklyar B. *Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie* [Digital communication. Theoretical bases and practical application]. Moscow, Vil'yams, 2003, 1104 p.

О. Г. ТРУБАЕВА<sup>1</sup>, М. А. ЧАЙКА<sup>2</sup>, О. В. ЗЕЛЕНСКАЯ<sup>1</sup>,  
А. И. ЛАЛАЯНЦ<sup>1</sup>, к. т. н. С. Н. ГАЛКИН<sup>1</sup>

Украина, г. Харьков, <sup>1</sup>Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины;  
Польша, г. Варшава, <sup>2</sup>Институт физики ПАН

E-mail: trubaeva.olya@gmail.com

## ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ СЕРЫ НА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СМЕШАННЫХ КРИСТАЛЛОВ $ZnS_xSe_{1-x}$

*Сцинтилляторы на основе  $ZnS_xSe_{1-x}$  являются перспективными люминесцентными материалами для рентгеновских и гамма-детекторов. В работе исследовано влияние содержания серы на основные свойства объемных кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$ , выращенных методом Бриджмена – Стокбаргера, с различным содержанием компонентов ( $x = 0,07–0,39$ ) и установлено, что интенсивность спектров рентгенолюминесценции максимальна при  $x = 0,22$ . Также показано, что по сравнению с коммерческими кристаллами  $ZnSe(Te)$  и  $ZnSe(Al)$  смешанные кристаллы  $ZnS_xSe_{1-x}$  обладают более высоким световыходом и лучшей термической стабильностью.*

*Ключевые слова:* смешанные кристаллы,  $ZnS_xSe_{1-x}$ , детектор излучения, сцинтиллятор, рентгенолюминесценция.

Халькогенидные сцинтилляторы на основе селенида цинка широко используются во многих областях радиационного приборостроения (дозиметрия, неразрушающий контроль, интроскопия и др.) [1–5]. Однако с развитием технологий ужесточаются требования, предъявляемые к таким материалам. На данный момент нет идеальных сцинтилляторов, которые подходили бы для решения всех проблем радиационной физики, а наиболее распространенные в настоящее время сцинтилляционные материалы имеют недостатки, существенно ограничивающие область их использования. В частности, у кристаллов чистого  $ZnSe$  низкий световыход, в кристаллах  $ZnSe(Te)$  плохая кинетика люминесценции, а для  $ZnSe(Al)$  характерен высокий коэффициент термогашения [6].

К кристаллам для сцинтилляционных детекторов выдвигается ряд требований, а именно: они должны обладать высоким оптическим качеством, иметь достаточно большие размеры, быть прозрачными для собственной длины волны излучения, преобразовывать энергию рентгеновского или  $\gamma$ -луча в оптические фотоны с высокой сцинтилляционной эффективностью, послесвечение должно быть коротким, а световыход высоким.

С этой точки зрения, среди различных соединений  $A^2B^6$  особый интерес могут представлять смешанные кристаллы  $ZnS_xSe_{1-x}$ , поскольку такая система имеет неограниченную взаимную растворимость, т. е. существует возможность создавать материал с любым содержанием

компонентов [7], а за счет увеличения ширины запрещенной зоны можно значительно поднять температуру тушения [8].

Смешанным кристаллам  $ZnS_xSe_{1-x}$  посвящено много публикаций, но в большинстве из них описаны кристаллы, выращенные из паровой фазы, и лишь в немногих – кристаллы, полученные методом выращивания из расплава [7–11]. Однако именно методы направленной кристаллизации позволяют создавать кристаллы  $ZnS_xSe_{1-x}$  достаточно больших размеров, пригодные, как уже отмечалось, для создания детекторов частиц высокой энергии. Соответственно, практически нет данных о свойствах объемных кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$ , как и доказательств их преимуществ над классическими сцинтилляторами  $ZnSe$ ,  $ZnSe(Al)$  и  $ZnSe(Te)$ , которые применяются в качестве рентгеновских и  $\gamma$ -детекторов.

В данной работе исследовано влияние концентрации серы на структурные, оптические, люминесцентные свойства объемных кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$  и проведено сравнение их свойств со свойствами кристаллов  $ZnSe$ ,  $ZnSe(Al)$ ,  $ZnSe(Te)$ .

### Образцы для исследований

Выращивание образцов смешанных кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$  для исследований проводили из шихты шести составов: при  $x = 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30$ . Для удаления кислородных примесей шихту перед выращиванием прокаливали при  $T = 1220$  К в течение 5 ч в атмосфере водорода в кварцевом тигле. Рост осуществляли

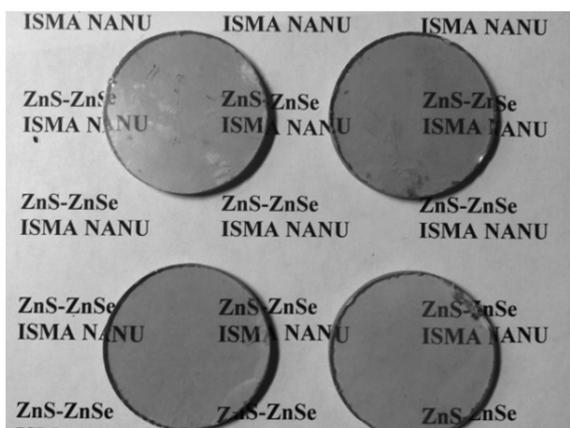


Рис. 1. Образцы кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$  после полировки

методом Бриджмена – Стокбаргера в графитовых тиглях диаметром 25 мм под давлением инертного газа ( $Ar, P_{Ar} = 10^7 - 10^9$  Па), скорость протяжки тигля через зону кристаллизации составляла 7 мм/ч, температуру нагревателя устанавливали от 1870 до 2000 К в зависимости от состава исходной шихты. Выращенные кристаллы с номинальным составом, соответствующим указанным значениям  $x$ , отжигали в парах цинка ( $T = 1223$  К,  $P_{Zn} = 5 \cdot 10^7$  Па,  $t = 48$  ч), который использовался для окончательного образования люминесцентных центров, а также для подавления безызлучательных релаксационных каналов, возбуждаемых носителями заряда [11, 12]. После отжига кристаллы разрезали перпендикулярно направлению роста, проводили шлифовку и полировку алмазным порошком и получали образцы для исследований в форме таблеток диаметром 25 мм и толщиной 4 мм (рис. 1).

Кристаллы ZnSe, ZnSe(Al) и ZnSe(Te) выращивали в аналогичных условиях, более подробно описанных в [11, 12].

Для определения содержания катионных примесей был проведен химический анализ, который также позволил определить фактический состав образцов (табл. 1).

### Методы исследований

Спектры рентгенолюминесценции регистрировали с применением спектрофотометрического комплекса КСВУ-23. В качестве источника рентгеновского излучения использовали рентгеновский аппарат РЕИС-И ( $Cu, U = 10 - 45$  кВ).

Измерение уровня послесвечения и абсолютного светового выхода выполняли с использованием рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом и кремниевым фотодиодом PD-24 Smiths Heimann AMS-1 с последующей автоматической математической обработкой данных.

Спектры пропускания измеряли на однолучевом спектрофотометре Shimadzu UVmini-1240. Структурные рентгеновские дифракционные измерения проводили с помощью излучения  $Cu K\alpha_1$  с использованием порошкового дифрактометра Брэгга – Брентано (X'Pert Pro Alpha1MPD от Philips/PANalytical), оснащенного монохроматором Джоанссона с падающим лучом Ge(111) и детектором полосы.

Относительный световой выход кристаллов определяли с помощью спектрофотометра Smiths Heimann AMS-1 спектрометрическим методом с использованием источников  $\gamma$ -квантов, таких как  $^{123}Cs$  (с энергией  $E_\gamma = 662$  кэВ) и  $^{241}Am$  ( $E_\gamma = 59,5$  кэВ), при рабочей температуре 294 К. В качестве фотоприемника использовали фотоумножитель (PMT) типа R1307, ГОСТ 17038.2-79 [13].

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

#### Рентгеновская дифракция

Сначала образцы  $ZnS_xSe_{1-x}$  были исследованы методом рентгеновской дифракции. Полученные результаты показали отсутствие посторонних фаз. Приближение Ритвельда не удалось вычислить из-за предпочтительной ориентации кристаллитов. Приведенные в табл. 1 значения постоянной решетки исследованных образцов указывают на высокие структурные свойства объемных кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$ .

Таблица 1

Характеристики исследуемых образцов кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$

Номер образца	1	2	3	4	5	6
Номинальный состав	$ZnS_{0,05}Se_{0,95}$	$ZnS_{0,1}Se_{0,9}$	$ZnS_{0,15}Se_{0,85}$	$ZnS_{0,2}Se_{0,8}$	$ZnS_{0,25}Se_{0,75}$	$ZnS_{0,3}Se_{0,7}$
Фактический состав	$ZnS_{0,07}Se_{0,93}$	$ZnS_{0,15}Se_{0,85}$	$ZnS_{0,22}Se_{0,78}$	$ZnS_{0,28}Se_{0,72}$	$ZnS_{0,32}Se_{0,68}$	$ZnS_{0,39}Se_{0,61}$
Постоянная решетки, нм	0,566550	0,566427	0,56277	0,56164	0,56029	0,55913

Спектры пропускания

Оптические исследования проводились при комнатной температуре. Как видно из рис. 2, пропускание смешанных кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$  различного состава ( $x = 0,07 - 0,39$ ) находится в диапазоне 61 – 67% при  $\gamma = 1100$  нм. Это указывает на высокое оптическое качество кристаллов.

Рентгенолюминесценция

Генерация света в кристаллах  $ZnS_xSe_{1-x}$  при преобразовании энергии рентгеновских или  $\gamma$ -квантов происходит на структуре дефектов, которые можно идентифицировать с помощью рентгенолюминесценции. На нормализованных спектрах рентгенолюминесценции (РЛ) исследованных образцов кристаллов, показанных на рис. 3, наблюдается широкая полоса с максимумом от 591 до 584 нм. Здесь видно, что увеличение концентрации серы приводит к сдвигу максимума полосы люминесценции в коротковолновую область, что связано с увеличением ширины запрещенной зоны при увеличении концентрации серы [14].

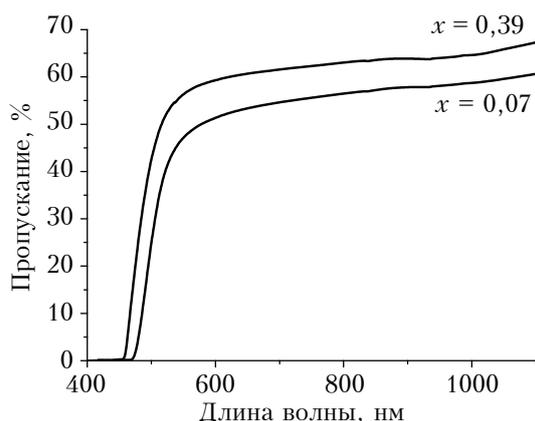


Рис. 2. Пропускание кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$

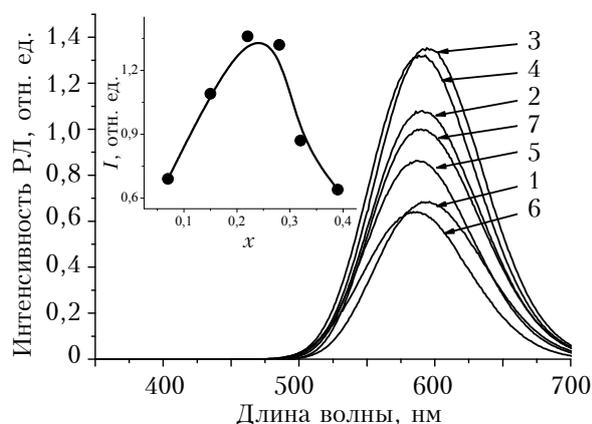


Рис. 3. Нормализованные спектры рентгенолюминесценции и зависимость интенсивности полосы люминесценции от состава кристалла  $ZnS_xSe_{1-x}$  (на вставке), полученные для образцов 1 – 6

Положение полос рентгенолюминесценции кристаллов  $ZnSe(Al)$  и  $ZnS_xSe_{1-x}$  совпадает и соответствует свечению тройного комплекса  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$ , а следовательно механизм радиационных переходов этих кристаллов идентичен [15 – 17]. Нормализованная интенсивность рентгенолюминесценции возрастает с увеличением концентрации серы и достигает максимума для образца 3 состава  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$  (см. вставку на рис. 3) за счет образования в этих кристаллах оптимального количества тройных комплексов  $V_{Zn}Zn_iO_{Se}$ . Дальнейшее увеличение содержания серы приводит к снижению интенсивности рентгенолюминесценции из-за увеличения количества дефектов в кристаллах  $ZnS_xSe_{1-x}$ .

Световыход

Световыход является одной из важных характеристик сцинтиллятора, которая определяет качество детектора, поэтому его измеряли двумя методами: при возбуждении рентгеновским излучением и спектрометрическим методом.

При возбуждении рентгеновским излучением величина светового выхода объемных кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$  практически всех составов была не ниже и даже выше, чем у кристаллов  $ZnSe(Te)$  (табл. 2). Например, для образца  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$  эта разница составляет более чем 1,5 раза.

Наряду со световыходом, было измерено также послесвечение, поскольку этот параметр определяет не только инерционность сцинтиллятора, но и динамический диапазон записанных сигналов. Послесвечение смешанных кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$  составляло около 0,02% через 15 мс, за исключением образца 6, и было достаточно

Таблица 2

Относительный световой выход кристаллов при возбуждении рентгеновским излучением\*

Образец	$C_{отн ZnSe(Te)}$ , %	Послесвечение, %, через		
		5 мс	15 мс	25 мс
1, $ZnS_{0,07}Se_{0,93}$	98	0,24	<0,02	<0,02
2, $ZnS_{0,15}Se_{0,85}$	84	0,15		
3, $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$	159	0,40		
4, $ZnS_{0,28}Se_{0,72}$	122	0,54		
5, $ZnS_{0,32}Se_{0,68}$	103	0,37		
6, $ZnS_{0,39}Se_{0,61}$	136	0,46	0,07	
$ZnSe(Te)$	100	0,30	0,17	
$ZnSe(Al)$	95	0,40	<0,02	
$ZnS$	75	58,04	39,74	31,77

\*  $C_{отн ZnSe(Te)}$  – световыход кристалла, приведенный к световыходу  $ZnSe(Te)$

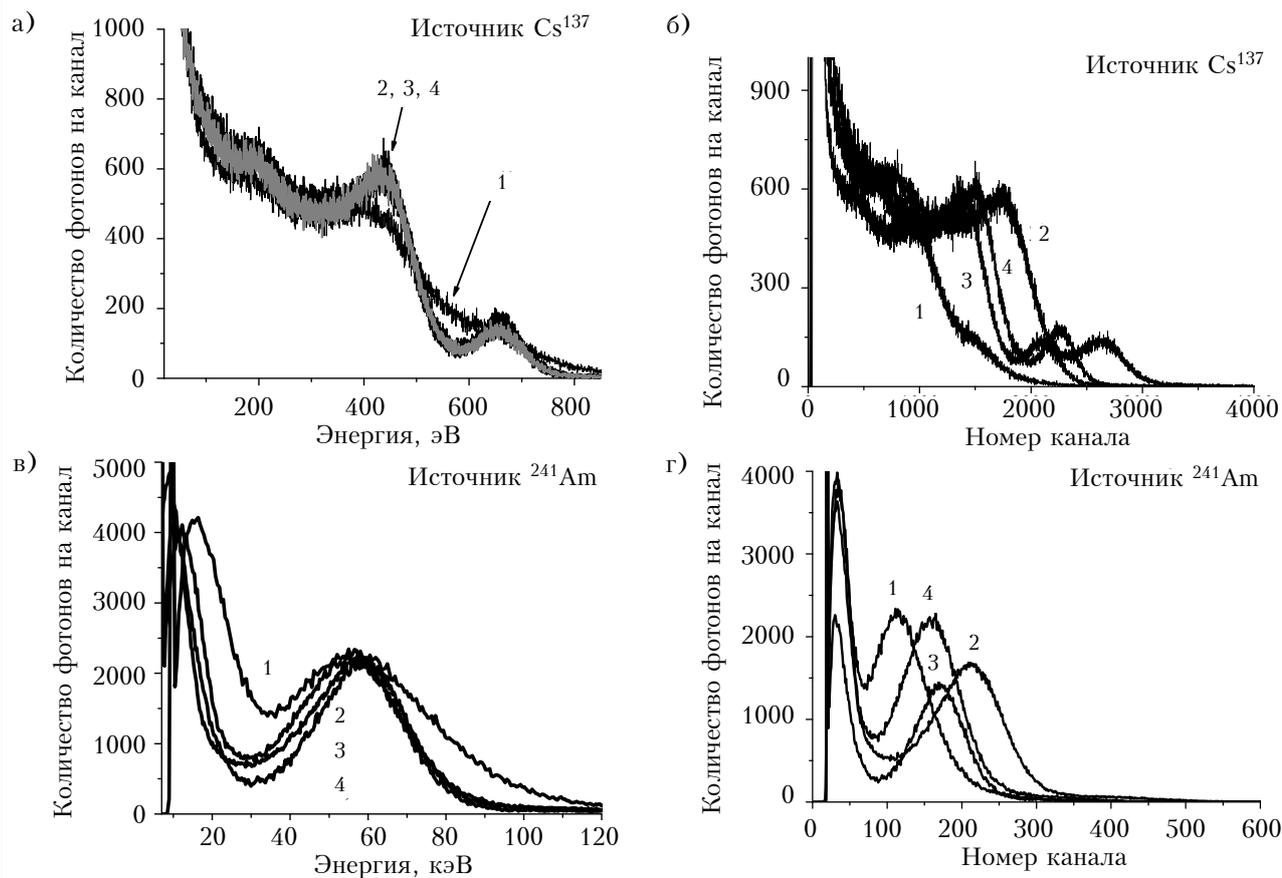


Рис. 4. Амплитудные спектры, полученные при измерениях с использованием источников  $^{137}\text{Cs}$  (а, б) и  $^{241}\text{Am}$  (в, г), четырех образцов кристаллов (а и в – энергетические спектры):  
 1 –  $\text{ZnS}_{0,07}\text{Se}_{0,93}$ ; 2 –  $\text{ZnS}_{0,15}\text{Se}_{0,85}$ ; 3 –  $\text{ZnS}_{0,22}\text{Se}_{0,78}$ ; 4 –  $\text{ZnS}_{0,28}\text{Se}_{0,72}$

коротким по сравнению с послеосвечением известных люминесцентных материалов, таких как ZnS (см. табл. 2), CsI (Tl),  $\text{Lu}_2\text{SiO}_5\text{:Ce}$  [18–20].

Измерения световых выходов спектрометрическим методом проводились с источниками  $^{241}\text{Am}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Как видно из рис. 4, а, после возбуждения  $^{137}\text{Cs}$  кристалла  $\text{ZnS}_{0,22}\text{Se}_{0,78}$  амплитуда пиков, соответствующих энергии 662 кэВ, невелика вследствие малого эффективного атомного номера данного сцинтиллятора [18, 19]. При измерениях с  $^{241}\text{Am}$  наблюдается удовлетворительное разрешение (рис. 4, в) как для энергии

59,5 кэВ, так и для 16,7 кэВ, что подтверждает высокую эффективность регистрации данными сцинтилляторами низкоэнергетических квантов. Энергетическое положение пиков для обоих источников облучения (рис. 4, б, г) свидетельствует о большем световых выводе смешанных кристаллов  $\text{ZnS}_{0,22}\text{Se}_{0,78}$ , чем кристалла  $\text{ZnSe(Al)}$ : на 116,6% при измерениях с  $^{137}\text{Cs}$  и на 130% при измерениях с  $^{241}\text{Am}$ . Спектрометрические параметры кристаллов  $\text{ZnS}_{0,15}\text{Se}_{0,85}$  и  $\text{ZnS}_{0,39}\text{Se}_{0,61}$  хуже, чем  $\text{ZnS}_{0,22}\text{Se}_{0,78}$ , как и при возбуждении рентгеновским излучением (см. табл. 3)

Таблица 3

Относительный световой выход кристаллов, измеренный в спектрометрическом режиме\*

Образец	$^{137}\text{Cs}$ , $E_\gamma = 662$ кэВ		$^{241}\text{Am}$ , $E_\gamma = 59,5$ кэВ	
	$E$ , кэВ	$C_{\text{отн ZnSe(Al)}}$ , %	$E$ , кэВ	$C_{\text{отн ZnSe(Al)}}$ , %
ZnSe(Al)	649	100	47	100,0
2, $\text{ZnS}_{0,15}\text{Se}_{0,85}$	443	68,3	33	70,7
3, $\text{ZnS}_{0,22}\text{Se}_{0,78}$	756	116,6	61	129,9
6, $\text{ZnS}_{0,39}\text{Se}_{0,61}$	606	93,4	46	98,8

\*  $C_{\text{отн ZnSe(Al)}}$  – световой выход кристалла, приведенный к световых выводу ZnSe(Al)

## Температурная зависимость световыхода

Увеличение концентрации серы в кристаллах  $ZnS_xSe_{1-x}$  приводит к увеличению термической стабильности за счет увеличения ширины запрещенной зоны. Из рис. 5 видно, что при изменении температуры от 20 до 100°C падение световыхода кристаллов  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$  и  $ZnS_{0,39}Se_{0,61}$  меньше, чем коммерческих сцинтилляторов  $ZnSe(Te)$  и  $ZnSe(Al)$ , что свидетельствует о лучшей термической стабильности световыхода объемных смешанных кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$ .

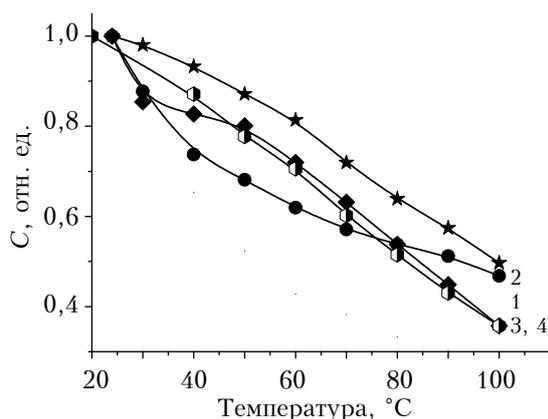


Рис. 5. Температурная зависимость световыхода четырех образцов кристаллов:

1 —  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$ ; 2 —  $ZnS_{0,39}Se_{0,61}$ ; 3, 4 —  $ZnSe(Te)$ ,  $ZnSe(Al)$

Повышение термической стабильности световыхода смешанных кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$  по сравнению с кристаллами  $ZnSe(Te)$  и  $ZnSe(Al)$  можно объяснить тем, что при примерно одинаковой энергии излучаемых фотонов ( $h\nu \approx 2$  эВ) энергия активации термогашения люминесценции кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$  ( $x = 0,05 - 0,3$ ) выше, чем  $ZnSe(Te)$  и  $ZnSe(Al)$  (0,8 эВ) [21], из-за чего термоионизация центров свечения в них происходит при более высокой температуре (70–80 К).

## Выводы

Исследования выращенных методом Бриджмена — Стокбаргера объемных смешанных кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$  в диапазоне составов  $x = 0,05 - 0,3$  методами рентгеновской дифракции, оптической спектроскопии, сцинтилляционной спектроскопии и спектрометрическим методом показали их высокие структурные и оптические качества. Лучшие параметры были получены для состава  $ZnS_{0,22}Se_{0,78}$ : при возбуждении рентгеновским излучением световыход такого кристалла в 1,6 раза выше, чем  $ZnSe(Al)$ , и в 1,3 раза выше при измерении спектрометрическим методом. Термическая стабильность смешанных

кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$  также лучше, чем классических сцинтилляторов  $ZnSe(Al)$  и  $ZnSe(Te)$ .

Таким образом, хорошие структурные и оптические свойства, высокая сцинтилляционная эффективность объемных кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$  позволяют использовать их в качестве высокоэффективных рентгеновских детекторов. Более того, на их основе может быть создан новый тип низкоэнергетических рентгеновских и  $\gamma$ -детекторов, а дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск условий выращивания кристаллов  $ZnS_xSe_{1-x}$  и возможностей расширения диапазона концентраций серы.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Ryzhikov V., Galchinetski L., Galkin S. et al. Combined detectors based on  $ZnSe(Te)$ ,  $CsI(Tl)$  and Si-PIN-PD for separate detection of alpha, beta and gamma radiation // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2000. — Vol. 47, iss. 6. — P. 1979-1981. <https://doi.org/10.1109/23.903832>
- Focsha A.I., Gashin P.A., Ryzhikov V.D., Starzhinskiy N.G. Preparation and properties of an integrated system «photosensitive heterostructure-semiconductor scintillator» on the basis of compound  $A^{II}B^{VI}$  // International Journal of Inorganic Materials. — 2001. — Vol. 21, iss. 8. — P. 1223-1225. — [https://doi.org/10.1016/S1466-6049\(01\)00134-9](https://doi.org/10.1016/S1466-6049(01)00134-9)
- Emam-Ismail M., El-Hagary M., Ramadan E. et al. Influence of  $\gamma$ -irradiation on optical parameters of electron beam evaporated  $ZnSe_{1-x}Te_x$  nanocrystalline thin films // Radiation Effects and Defects in Solids. — 2014. — Vol. 169, iss. 1. — P. 61-72. — <https://doi.org/10.1080/10420150.2013.811505>
- Gavrishchuk E.M. The polycrystalline zinc selenide for infrared optics // Inorganic Materials. — 2003. — Vol. 39, iss. 9. — P. 1031-1049. — <https://doi.org/10.1023/A:1025529017192>
- Atroshenko L.V., Galchinetskii L.P., Galkin S.N. et al. Distribution of tellurium in melt-grown  $ZnSe(Te)$  crystals // Journal of Crystal Growth. — 1999. — Vol. 197, iss. 3. — P. 471-474. — [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)00963-4](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)00963-4)
- Старжинский Н.Г., Гринев Б.В., Гальчинецкий Л.П., Рыжиков В.Д. Сцинтилляторы на основе соединений  $A^{II}B^{VI}$ . Получение, свойства и особенности применения. — Харьков: Институт монокристаллов, 2007.
- Hussein R. H., Pagis O., Doyen-Schuler S. et al. Percolation-type multi-phonon pattern of  $Zn(Se,S)$ : Backward/forward Raman scattering and ab initio calculations. // Journal of Alloys and Compounds. — 2015. — Vol. 644. — P. 704-720. — <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.04.078>
- Fujita S., Mimoto H., Takebe H., Noguchi T. Growth of cubic  $ZnS$ ,  $ZnSe$  and  $ZnS_xSe_{1-x}$  single crystals by iodine transport // Journal of Crystal Growth. — 1979. — Vol. 47, iss. 3. — P. 326-334. — [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(79\)90195-7](https://doi.org/10.1016/0022-0248(79)90195-7)
- Hajj Hussein R., Pagés O., Firszt F. et al. Near-forward Raman study of a phonon-polariton reinforcement regime in the  $Zn(Se,S)$  alloy // Journal of Applied Physics. — 2014. — Vol. 116, N 8. — P. 083511. — <https://doi.org/10.1063/1.4893322>
- Hussein R. H., Polian A. et al. Pressure-induced phonon freezing in the  $ZnSeS$  II-VI mixed crystal: phonon-polaritons and ab initio calculations. // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2016. — Vol. 28, N. 20. — P. 205401. — <http://stacks.iop.org/0953-8984/28/i=20/a=205401>
- Trukhanova E. L., Levchenko V. I., Postnova L. I. Crystal growth of  $ZnSe_{1-x}S_x$  solid solutions at the lowest possible vapor pressure // Inorganic Materials. — 2014. — Vol. 50, N 1. — P. 10-12. — <https://doi.org/10.1134/S0020168514010191>
- Catano A., Kun Z. K. Growth and characterization of  $ZnSe$  and homogeneous  $ZnS_xSe_{1-x}$  crystals // Journal of

Crystal Growth. — 1976. — Vol. 33, iss. 2. — P. 324–330. — [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(76\)90059-2](https://doi.org/10.1016/0022-0248(76)90059-2)

13. ГОСТ 17038.2-79 Детекторы ионизирующих излучений сцинтилляционные. Метод измерения светового выхода детектора по пику полного поглощения или краю комптоновского распределения

14. Larach S., Shrader R.E., Stocker C.F. Anomalous variation of band gap with composition in zinc sulfo- and seleno-tellurides // Physics Review. — 1957. — Vol. 108, iss. 3. — P. 587–593. — <https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.587>

15. Shirakawa Y., Kukimoto H. The electron trap associated with an anion vacancy in ZnSe and ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> // Solid State Compounds. — 1980. — Vol. 34, iss. 5. — P. 359–361. — [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(80\)90575-X](https://doi.org/10.1016/0038-1098(80)90575-X)

16. Watkins G.D. Radiation effects in semiconductors. — Gordon & Breach, New York. — 1971. — P. 301–308.

17. Ryzhikov V. D., Starzhinskiy N. G., Galchinetskiy L. P. et al. The role of oxygen in formation of radiative recombination centers in ZnSe<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub> crystals // International Journal of Inorganic Materials. — 2001. — Vol. 3, iss. 8. —

P. 1227–1229. — [https://doi.org/10.1016/S1466-6049\(01\)00138-6](https://doi.org/10.1016/S1466-6049(01)00138-6)

18. Берченко Н. Н., Кревс В. Е., Средин В. Г. Полупроводниковые твердые растворы и их применение: Справ. табл. — Москва: Воениздат, 1982.

19. Гурвич А.М. Введение в физическую химию кристаллофосфоров. — Москва: Высшая школа, 1971.

20. Kilgus U., Kotthaus R., Lange E. Prospect of CsI(Tl)-photodiode detectors for low-level spectroscopy // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1990. — Vol. 297, iss. 3. — P. 425–440. — [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(90\)91325-6](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)91325-6)

21. Pamplin B. R. Crystal growth // Kristall und Technik (Crystal Research and Technology). — 1975. — Vol. 10, iss. 7. — P. 707–794. — <https://doi.org/10.1002/crat.19750100725>

Дата поступления рукописи  
в редакцию 3.01 2017 г.

О. Г. ТРУБАЄВА<sup>1</sup>, М. А. ЧАЙКА<sup>2</sup>, О. В. ЗЕЛЕНЬСКА<sup>1</sup>, О. І. ЛАЛЯНЦ<sup>1</sup>, С. М. ГАЛКІН<sup>1</sup>

Україна, м. Харків, <sup>1</sup>Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України;  
Польща, м. Варшава, <sup>2</sup>Інститут фізики ПАН  
E-mail: trubaeva.olya@gmail.com

## ВПЛИВ ВМІСТУ СІРКИ НА СЦИНТИЛЯЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗМІШАНИХ КРИСТАЛІВ ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub>

Халькогенідні сцинтилятори на основі селеніду цинку широко використовуються в багатьох областях радіаційного приладобудування, однак з розвитком технологій посилюються вимоги, що пред'являються до таких матеріалів. На даний момент немає ідеальних сцинтиляторів, які підходили б для вирішення всіх проблем радіаційної фізики, а найбільш поширені в даний час сцинтиляційні матеріали мають недоліки, що істотно обмежують область їх використання.

Серед люмінофорів на основі A<sup>2</sup>B<sup>6</sup> особливий інтерес становлять змішані кристали ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> завдяки необмеженій взаємній розчинності компонентів та можливості збільшення температури гасіння за рахунок збільшення ширини забороненої зони. В даній роботі було досліджено вплив вмісту сірки на основні властивості об'ємних кристалів ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> і проведено порівняння їх властивостей з властивостями кристалів ZnSe, ZnSe(Al), ZnSe(Te). Зразки для досліджень були вирошені методом Бріджмена — Стокбаргера в графітових тиглях діаметром 25 мм під тиском інертного газу (Ar, P = 10<sup>7</sup>–10<sup>9</sup> Па) при температурі 1870–2000 К залежно від складу вихідної шихти. Отримано об'ємні кристали ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> з різним вмістом компонентів: при x = 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30. Встановлено, що сцинтиляційні властивості досліджених кристалів залежать від вмісту сірки, а кращі параметри були отримані при x = 0,22, тобто для зразків ZnS<sub>0,22</sub>Se<sub>0,78</sub>. Було показано, що максимум смуги рентгенолюмінесценції знаходиться в області 584–591 нм, що відповідає максимальній чутливості кремнієвих фотодіодів. Виявлено, що інтенсивність рентгенолюмінесценції кристалів зростає зі збільшенням вмісту сірки і досягає максимуму для складу ZnS<sub>0,22</sub>Se<sub>0,78</sub>.

Показано, що кристали ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> мають кращий світловихід та кращу термічну стабільність у порівнянні з комерційними кристалами ZnSe(Te) і ZnSe(Al).

На основі проведених досліджень зроблено висновок, що об'ємні кристали ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> можна використовувати як високоефективні детектори рентгенівського та γ-випромінювання.

Ключові слова: змішані кристали, ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub>, детектор випромінювання, сцинтилятор, рентгенолюмінесценція.

DOI: 10.15222/TKEA2017.1.36  
UDC 535-34; 535-36

О. Г. ТРУБАЄВА<sup>1</sup>, М. А. ЧАЙКА<sup>2</sup>,  
О. В. ЗЕЛЕНЬСКА<sup>1</sup>, А. І. ЛАЛЯНЦ<sup>1</sup>, С. Н. ГАЛКІН<sup>1</sup>

Ukraine, Kharkov, <sup>1</sup>Institute of scintillation materials of the National Academy of Sciences of Ukraine;  
Poland, Warsaw, <sup>2</sup>Institute of Physics, PAN  
E-mail: trubaeva.olya@gmail.com

## EFFECT OF SULFUR ON THE SCINTILLATION PROPERTIES OF MIXED ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> CRYSTALS

ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> based luminescent materials are promising for use as X-ray and γ-ray detectors. The main advantage of ZnS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> crystals is the possibility of making of solid solutions over an entire X-range. It was found that varying

the composition of  $ZnS_xSe_{1-x}$  crystals can change their luminescent properties. Many studies were focused on obtaining  $ZnS_xSe_{1-x}$  mixed crystals, most using a vapour phase growth methods, and only some of works used the directional solidification. The directional solidification techniques allow growing large  $ZnS_xSe_{1-x}$  crystals for high-energy particles detectors. Practical use, however, requires the knowledge about luminescent properties of  $ZnS_xSe_{1-x}$  bulk crystals.

This study reports the effect of sulfur content on basic properties of  $ZnS_xSe_{1-x}$  bulk crystals grown by Bridgman-Stockbarger method. Six different compounds were studied:  $ZnS_{0.07}Se_{0.93}$ ,  $ZnS_{0.15}Se_{0.85}$ ,  $ZnS_{0.22}Se_{0.78}$ ,  $ZnS_{0.28}Se_{0.72}$ ,  $ZnS_{0.32}Se_{0.68}$ ,  $ZnS_{0.39}Se_{0.61}$ . The  $ZnSe(Al)$  and  $ZnSe(Te)$  crystals grown at the similar conditions were used as reference. X-ray luminescence was studied using PEIC-II (REIS-I) X-ray source (Cu,  $U = 10-45$  kV). KCBY-23 (KSVU-23) spectrophotometer was used to analyse the emission spectra. The afterglow level  $\eta(\%)$  was determined by Smiths Heimann AMS-1 spectrophotometer at excitation by such X-ray and  $\gamma$ -ray sources as  $^{123}Cs$  and  $^{241}Am$  (59.5 keV).

Light output is one of the main characteristics of the scintillator, which determines its quality as a detector. The  $ZnS_xSe_{1-x}$  crystals demonstrated increase in the intensity of X-ray induced luminescence spectra with increasing of sulfur content and reached maximum for  $ZnS_{0.22}Se_{0.78}$  composition. Light output of  $ZnS_xSe_{1-x}$  bulk crystals are higher than those of  $ZnSe(Te)$  and  $ZnSe(Al)$  commercial crystals. Moreover, thermal stability of scintillation light output of  $ZnS_xSe_{1-x}$  bulk crystals are also better than those. This investigation has revealed that basic properties of  $ZnS_xSe_{1-x}$  based scintillation detectors are better than those of  $ZnSe(Te)$  and  $ZnSe(Al)$ .

**Keywords:**  $ZnSe_{1-x}S_x$  bulk crystals, radiation detector, scintillator, X-ray induced luminescence.

## REFERENCES

- Ryzhikov V., Galchinetski L., Galkin S., Danshin E., Kvitnitskaya V., Silin, V., Chernikov V. Combined detectors based on  $ZnSe(Te)$ ,  $CsI(Tl)$  and Si-PIN-PD for separate detection of alpha, beta and gamma radiation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000, vol. 47, iss. 6, pp. 1979-1981. <https://doi.org/10.1109/23.903832>
- Focsha A.I., Gashin P.A., Ryzhikov V.D., Starzhinskiy N.G. Preparation and properties of an integrated system «photosensitive heterostructure-semiconductor scintillator» on the basis of compound  $A^{II}B^{VI}$ . *International Journal of Inorganic Materials*, 2001, vol. 21, iss. 8, pp. 1223-1225. [https://doi.org/10.1016/S1466-6049\(01\)00134-9](https://doi.org/10.1016/S1466-6049(01)00134-9)
- Emam-Ismail M., El-Hagary M., Ramadan E., Matar A., El-Taheer A. Influence of  $\gamma$ -irradiation on optical parameters of electron beam evaporated  $ZnSe_{1-x}Te_x$  nanocrystalline thin films. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 2014, vol. 169, iss. 1, pp. 61-72. <https://doi.org/10.1080/10420150.2013.811505>
- Gavrishchuk E. M. The polycrystalline zinc selenide for infrared optics. *Inorganic Materials*, 2003, vol. 39, iss. 9, pp. 1031-1049. <https://doi.org/10.1023/A:1025529017192>
- Atroshenko L.V., Galchinetskii L.P., Galkin S.N., Silin V.I., Shevtsov N.I. Distribution of tellurium in melt-grown  $ZnSe(Te)$  crystals. *Journal of Crystal Growth*, 1999, vol. 197, iss. 3, pp. 471-474. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)00963-4](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)00963-4)
- Starzhinskiy N.G., Grinyov B.V., Galchinetskii L.P., Ryzhikov V.D. *Stsintillyatory na osnove soedinenii  $A^{II}B^{VI}$ . Poluchenie, svoystva i osobennosti primeneniya* [The scintillators based compounds  $A^{II}B^{VI}$ . Preparation, properties and features of the application]. Kharkov, Institute for Single Crystals, 2007, 296 p. (Rus)
- Hussein R. H., Pagés O., Doyen-Schuler S., Dicko H., Postnikov A. V., Firszt F., Gorochov O. Percolation-type multi-phonon pattern of  $Zn(Se,S)$ : Backward/forward Raman scattering and ab initio calculations. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 644, pp. 704-720. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.04.078>
- Fujita S., Mimoto H., Takebe H., Noguchi T. Growth of cubic  $ZnS$ ,  $ZnSe$  and  $ZnS_xSe_{1-x}$  single crystals by iodine transport. *Journal of Crystal Growth*, 1979, vol. 47, iss. 3, pp. 326-334. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(79\)90195-7](https://doi.org/10.1016/0022-0248(79)90195-7)
- Hajj Hussein R., Pagés O., Firszt F., Marasek A., Paszkowicz W., Maillard A., Broch L. Near-forward Raman study of a phonon-polariton reinforcement regime in the  $Zn(Se,S)$  alloy. *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 116, no. 8, pp. 083511. <https://doi.org/10.1063/1.4893322>
- Hussein R. H., Pagés O., Polian A., Postnikov A. V., Dicko H., Firszt F., Fertey P. Pressure-induced phonon freezing in the  $ZnSeS$  II-VI mixed crystal: phonon-polaritons and ab initio calculations. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2016, vol. 28, no. 20, pp. 205401. <http://stacks.iop.org/0953-8984/28/i=20/a=205401>
- Trukhanova E. L., Levchenko V. I., Postnova L. I. Crystal growth of  $ZnSe_{1-x}S_x$  solid solutions at the lowest possible vapor pressure. *Inorganic Materials*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 10-12. <https://doi.org/10.1134/S0020168514010191>
- Catano A., Kun Z. K. Growth and characterization of  $ZnSe$  and homogeneous  $ZnS_xSe_{1-x}$  crystals. *Journal of Crystal Growth*, 1976, vol. 33, iss. 2, pp. 324-330. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(76\)90059-2](https://doi.org/10.1016/0022-0248(76)90059-2)
- GOST 17038.2-79 Scintillation detectors of ionizing radiation. The method of measuring the light output of the detector at the peak of total absorption. (Rus)
- Larach S., Shrader R.E., Stocker C.F. Anomalous variation of band gap with composition in zinc sulfo- and seleno-tellurides. *Physics Review*, 1957, vol. 108, iss. 3, pp. 587-593. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.587>
- Shirakawa Y., Kukimoto H. The electron trap associated with an anion vacancy in  $ZnSe$  and  $ZnS_xSe_{1-x}$ . *Solid State Compounds*, 1980, vol. 34, iss. 5, pp. 359-361. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(80\)90575-X](https://doi.org/10.1016/0038-1098(80)90575-X)
- Watkins G.D. *Radiation Effects in Semiconductors*. Gordon & Breach, New York, 1971, pp. 301-308.
- Ryzhikov V. D., Starzhinskiy N. G., Galchinetskii L. P., Silin V. I., Tamulaitis G., Lisetskaya E. K. The role of oxygen in formation of radiative recombination centers in  $ZnSe_{1-x}Te_x$  crystals. *International Journal of Inorganic Materials*, 2001, vol. 3, iss. 8, pp. 1227-1229. [https://doi.org/10.1016/S1466-6049\(01\)00138-6](https://doi.org/10.1016/S1466-6049(01)00138-6)
- Berchenko N. N. et al. [*Semiconductor solid solutions and their application: Reference tables*]. Moscow, Military Publishing, 1982, 208 p. (Rus)
- Gurvich A. M. [*Introduction to the physical chemistry of crystal phosphor*]. Moscow, Graduate School, 1971, 336 p. (Rus)
- Kilgus, Kotthaus R., Lange E. Prospect of  $CsI(Tl)$ -photodiode detectors for low-level spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1990, vol. 297, iss. 3, pp. 425-440. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(90\)91325-6](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)91325-6)
- Pamplin B. R. Crystal growth. *Kristall und Technik (Crystal Research and Technology)*, 1975, vol. 10, iss. 7, pp. 707-794. <https://doi.org/10.1002/crat.19750100725>

Д. ф.-м. н. А. С. ТОНКОШКУР, к. ф.-м. н. А. В. ИВАНЧЕНКО,  
к. т. н. Л. В. НАКАШИДЗЕ, С. В. МАЗУРИК

Украина, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

## ПРИМЕНЕНИЕ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

*Проанализированы возможности применения самовосстанавливающихся предохранителей на основе полимерных композитов с нанокремнеземными наполнителями для электрической изоляции «перегретых» фотоэлектрических элементов солнечных батарей. Исследования вольт-амперной и ватт-амперной характеристик проведены с использованием модели структуры, представляющей собой параллельное соединение нескольких последовательно включенных фотоэлектрических элементов и указанных предохранителей. Рассмотрено влияние температуры окружающей среды и дрейфа сопротивления предохранителей в проводящем состоянии в процессе их многократного срабатывания. Установлено, что предложенные элементы защиты не влияют на работу солнечных батарей в рабочем диапазоне температур и могут применяться для электрической изоляции локальных областей и компонентов солнечных батарей с повышенной температурой.*

*Ключевые слова:* самовосстанавливающийся предохранитель, полимерный нанокompозит, фотоэлектрический элемент, вольт-амперная характеристика, кривая мощности, перегрев.

Солнечные батареи являются одними из наиболее перспективных источников возобновляемой электроэнергии. Они состоят из десятков и сотен тысяч отдельных фотоэлектрических (PV, photovoltaic) элементов, соединенных параллельно-последовательно с целью обеспечения требуемых номиналов тока и напряжения. Одним из определяющих факторов обеспечения оптимального режима функционирования и надежности таких многокомпонентных систем является идентичность фотоэлектрических характеристик PV-элементов.

В процессе эксплуатации, однако, в PV-элементах и их соединениях возникают различные дефекты (из-за коррозии, миграции металла через  $p-n$ -переход, ухудшения качества контактов и антиотражающего покрытия, коротких замыканий и обрыва соединительных проводов и т. д. [1]). Вместе с функционированием в условиях меняющейся неоднородной освещенности это приводит к так называемым несоответствиям (различиям) между параметрами отдельных элементов и их групп, в результате чего возникают их локальные перегревы и интенсифицируются процессы деградации [1–3].

В настоящее время наиболее известным способом снижения влияния несоответствия, в частности, в фотоэлектрических модулях (PVM) при последовательном соединении PV-элементов является использование шунтирующих обводных

диодов, при параллельном соединении — блокирующих диодов [1, 4–6]. Это позволяет снизить потери энергии, связанные с неоднородностью освещения солнечных батарей, но при этом далеки до полного решения остаются проблемы, связанные с перегревом. Наиболее известные из них:

- наличие локальных точек разогрева типа «горячих пятен» непосредственно в PV-элементах или в их приконтактных областях [2, 3], вызванных короткими замыканиями и деградационными процессами;

- электрический разогрев диодов в PVM и в панелях батарей, а также зависимость их функциональных свойств от температуры [1].

Поскольку повышенная температура стимулирует деградацию PV-элементов (а также обводных и блокирующих диодов) [2, 3, 7, 8], с целью увеличения срока службы солнечных батарей в ряде случаев может быть целесообразным временное отключение (изоляция) некоторых ее элементов. Одним из перспективных решений такой задачи представляется использование в качестве дополнительных устройств для изоляции неактивных (затененных или дефектных) областей как отдельных PV-элементов, так и их модулей, самовосстанавливающихся PPTC-предохранителей (PPTC, polymeric positive temperature coefficient) типа PolySwiTh, представляющих собой полимерные композиты

с наноразмерными углеродными наполнителями. Базовое функциональное свойство РРТС-предохранителя — скачкообразное, на несколько порядков, увеличение электрического сопротивления при достижении некоторой пороговой температуры и возврат в исходное высокопроводящее состояние при понижении температуры [9, 10].

РРТС-предохранители эффективно защищают источники питания в случае короткого замыкания или перегрузки по току. В частности, такие элементы нашли применение как устройства электрической и тепловой защиты в аккумуляторах и гальванических источниках питания [11–15]. Так, ленточные элементы PolySwitch разработаны для защиты никель-кадмиевых, никель-гидридометаллических и литий-ионных аккумуляторных батарей, используемых в телефонных аппаратах сотовой связи, компьютерах типа «Ноутбук» и другом переносном электронном оборудовании. Сверхплоские компоненты можно приваривать непосредственно на элементы батареи для их защиты от перегрева, вызванного коротким замыканием или перегрузкой по току. При устранении неисправности сопротивление прибора возвращается к своему исходному низкоомному значению, и батарею можно использовать снова. Такая защита может выполняться многократно, предотвращая необратимые деградиационные процессы в защищаемых элементах и не вызывая их разрушение.

К достоинствам таких структур на основе полимерных композитов с наноуглеродными наполнителями можно отнести:

- сопротивление, близкое к сопротивлению металлов, при температуре ниже температуры переключения и близкое к сопротивлению изолятора при температуре выше нее [9, 10];

- возможность реализации в виде дискретных элементов и непрерывных пленок-лент [13, 14] (что важно при выполнении изоляции локальной дефектной области отдельного РV-элемента);

- возможность временного отключения отдельных разогретых неактивных (например, затененных) компонентов солнечной батареи от общей электрической цепи [9, 10].

В настоящей работе исследованы возможности применения предохранителей на основе полимерных композитов с наноуглеродными наполнителями для изоляции «перегретых» фотоэлектрических элементов, изучено их влияние на работу солнечной батареи в рабочем диапазоне температуры и способность выполнять свою функцию в нештатных ситуациях, связанных с перегревом.

### Образцы для исследований

Типичная температурная зависимость сопротивления РРТС-предохранителя представлена на **рис. 1** ( $R_{1max}$  — максимальное сопротивление восстановления, т. е. сопротивление через 1 час после срабатывания).

Скачкообразная форма представленной на рис. 1 зависимости определяется структурными особенностями основного функционального материала РРТС-предохранителя, который представляет собой нанокомпозит с непроводящей полимерной матрицей (например, из полиэтилена) и высокопроводящим наполнителем (как правило, техническим углеродом). Благодаря наличию углеродных каналов в структуре РРТС-предохранителя, он является проводником с низким собственным сопротивлением при температурах  $T$  ниже температуры его срабатывания (участок 1 на рис. 1). При разогреве выше определенной температуры (температуры перехода  $T_{II}$ ) каналы, состоящие из частиц углерода, разрываются за счет объемного расширения полимерной матрицы и/или трансформации кристаллической структуры матрицы в аморфную, и электрическое сопротивление рассматриваемой структуры резко возрастает (участок 2) [10, 16, 17]. На участке 3 структура проводящих каналов полностью разрушается и сопротивление РРТС-предохранителя достигает максимальной величины.

Рабочий диапазон температур, где гарантируется низкопроводящее состояние, для коммерческих РРТС-предохранителей составляет от  $-40$  до  $125^{\circ}\text{C}$  или до  $85^{\circ}\text{C}$ , при этом известны и более низкотемпературные их типы с максимальной температурой  $60^{\circ}\text{C}$  [18, 19]. Температура перехода  $T_{II}$  для известных РРТС-предохранителей лежит в диапазоне  $90–125^{\circ}\text{C}$  [20], т. е. может находиться несколько выше максимальной температуры рабочего диапазона.

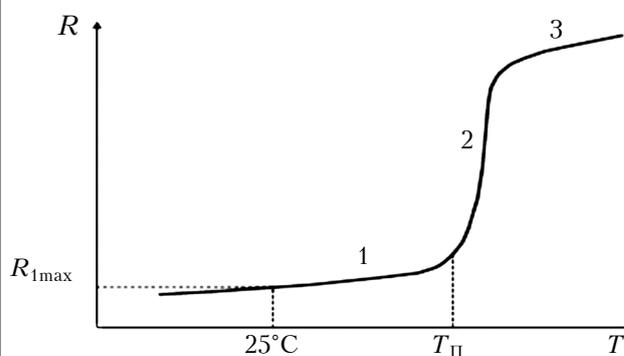


Рис. 1. Зависимость сопротивления РРТС-предохранителя от температуры (в логарифмическом масштабе) [10]

В исследованиях использовались образцы PV-элементов из монокристаллического кремния КДБ-10 с просветляющим покрытием на основе ITO [21] и РРТС-предохранители типа FRX375-60F.

### Методика исследований

Для экспериментального изучения возможностей самовосстанавливающихся предохранителей рассматриваемого типа для защиты от перегрева или короткого замыкания компонентов солнечных батарей исследовалась модель структуры, представляющей собой параллельное соединение нескольких последовательно включенных PV-элементов и РРТС-предохранителей, роль нагрузки выполнял переменный резистор.

Выбор такой структуры определялся тем, что она соответствует соединению фотоэлектрических модулей в солнечных панелях и батареях, а также тем, что ее можно рассматривать как дискретное представление отдельного солнечного PV-элемента, где элементы модели соответствуют локальным областям отдельной солнечной «клетки» (которые соизмеримы с областями локального разогрева или короткого замыкания).

Для измерения вольт-амперной  $I(U)$  характеристики (**ВАХ**) и кривой мощности  $P(U)$  использовалась известная измерительная схема вольтметра-амперметра [22].

Роль источника света выполнял имитатор солнечного излучения, моделирующий условия АМ1,5. Для исследований при повышенной температуре модель солнечной батареи помещалась в разогретый термостат, а после каждого такого измерения охлаждалась до комнатной температуры в свободном режиме.

### Влияние наличия РРТС-предохранителей на фотоэлектрические характеристики модели

На рис. 2 приведены характеристики модели солнечной батареи, состоящей из шести включенных параллельно образцов PV-элементов, при использовании самовосстанавливающихся предохранителей и без них.

Последовательность проведения исследований была следующей. При комнатной температуре  $T_K$  измерялись ВАХ и кривая мощности модели без и с подключением предохранителей, которые при  $T_K$  находятся в высокопроводящем состоянии. Далее одна из цепей «PV-элемент — РРТС-предохранитель» нагревалась до температуры выше температуры срабатывания  $T_C$  предохранителя ( $T_C \approx T_{II}$ ), затем охлаждалась до  $T_K$ , после чего снова проводились измерения.

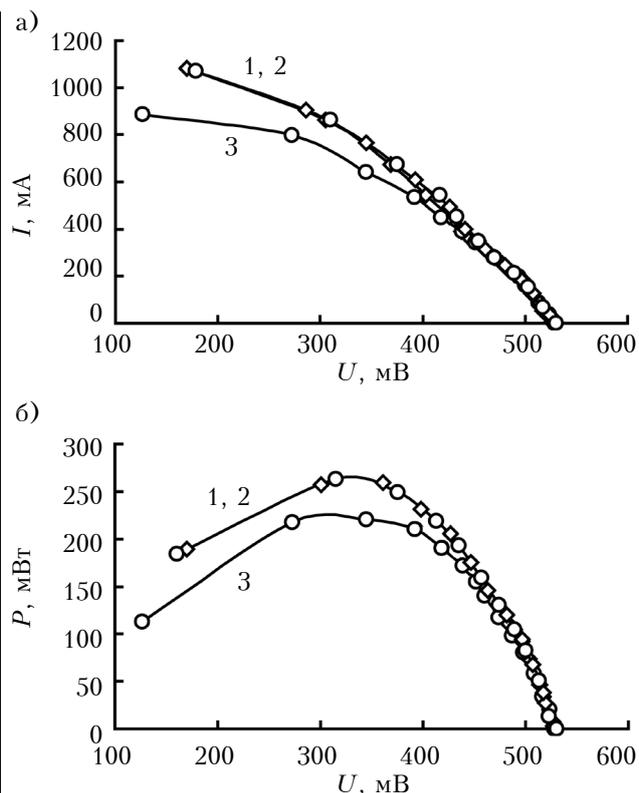


Рис. 2. ВАХ (а) и кривые мощности (б) модели солнечной батареи без (1) и с РРТС-предохранителями (2, 3):

1, 2 — все PV-элементы имеют комнатную температуру; 3 — один PV-элемент нагрет до температуры выше  $T_{II}$

Как видно из рис. 2 (кривые 1, 2) наличие самовосстанавливающихся предохранителей в электрической схеме модели солнечной батареи не влияет на ее фотоэлектрические характеристики в случае исправности всех ее PV-элементов.

На рис. 2 (кривая 3) представлены характеристики исследуемой модели солнечной батареи при наличии отказа, т. е. когда одна из цепей «PV-элемент — РРТС-предохранитель» имеет температуру выше точки перехода блокирующего предохранителя в низкопроводящее (изолирующее) состояние. Это состояние может достигаться и за счет увеличения температуры указанной цепи, и за счет подогрева его электрическим током. Как видно, такой отказ (перегрев) отдельных элементов приводит к тем же результатам, что и при использовании механического отключения или блокирования с использованием диодов.

### Влияние температуры окружающей среды на функционирование модели с РРТС-предохранителями

Как было показано выше, электрические характеристики РРТС-предохранителей сильно за-

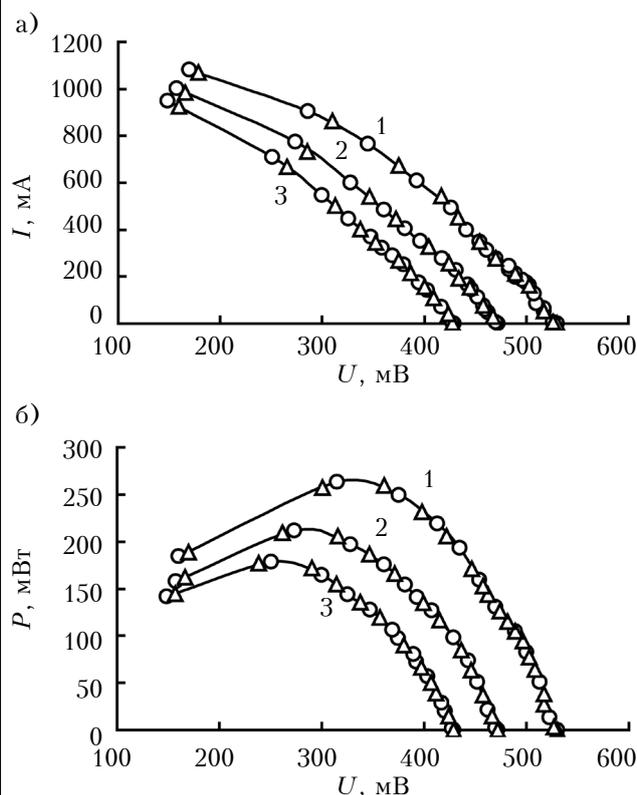


Рис. 3. ВАХ (а) и кривые мощности (б) модели солнечной батареи без (○) и с РРТС-предохранителями (△) при различных значениях  $T_{OC}$ : 1 – 25°C; 2 – 40°C; 3 – 55°C

висят от температуры окружающей среды  $T_{OC}$ . В связи с этим представляется важным определить, не повлияет ли этот факт на функциональные свойства солнечных батарей при применении РРТС-предохранителей для реализации защиты батарей и их узлов от перегрева. С этой целью при различных значениях  $T_{OC}$ , меньших температуры срабатывания  $T_C$  РРТС-предохранителей, были измерены ВАХ и кривые мощности исследуемой модели. Как видно из рис. 3, во всем диапазоне ниже  $T_C$  характеристики солнечных батарей не зависят от наличия предохранителей.

Следует отметить, что при применении РРТС-структур в качестве защиты от больших токов температурный фактор обуславливает специфику их поведения. В частности, при повышении  $T_{OC}$  имеет место некоторое уменьшение тока и времени срабатывания предохранителя. Чем больше  $T_{OC}$ , тем меньшая электрическая мощность требуется для достижения температуры перехода РРТС-структуры в низкопроводящее состояние, а также быстрее происходит ее нагрев. Диапазон времени срабатывания составляет от единиц миллисекунд до нескольких секунд [9, 10].

### Стабильность фотоэлектрических характеристик модели с РРТС-предохранителями

Спецификой работы РРТС-предохранителя является то, что после вызванного тепловым переключением срабатывания требуется достаточно продолжительное время для его восстановления. Оно может длиться сутками и более и не бывает полным в течение реального времени работы устройства при реальных значениях температуры окружающей среды ( $T_{OC} \approx 20^\circ C$ ) [23]. В связи с этим для характеристики кинетики процесса восстановления используется параметр  $R_{1max}$  – сопротивление предохранителя после одного часа восстановления при заданной температуре окружающей среды.

После каждого срабатывания сопротивление РРТС-предохранителя в проводящем состоянии может дрейфовать и, как правило, несколько увеличивается. Результаты измерений, которые проводились при включении в цепь солнечной батареи предохранителей, подвергавшихся разному числу циклических срабатываний, показали, что диапазон этого дрейфа незначителен, а значит можно говорить об отсутствии влияния указанных кинетических тепловых эффектов на стабильность фотоэлектрических характеристик рассматриваемых объектов. Этот вывод согласуется с тем, что гарантируемое изготовителями РРТС-предохранителей число переходов от проводящего состояния к непроводящему и обратно составляет порядка нескольких тысяч, т. е. практически неограниченно. К тому же, в рабочем (высокопроводящем) состоянии РРТС-предохранители, как правило, имеют достаточно низкое сопротивление, которое либо практически не изменяется [24], либо его изменения небольшие [23] и не сказываются на работе и характеристиках как защищаемого устройства, в данном случае фотоэлектрического элемента, так и других электронных приборов.

### Выводы

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод, что рассматриваемые элементы защиты на основе полимерных композитов с нанокремнеземными наполнителями функционируют как многократные (самовосстанавливающиеся) предохранители, которые не нуждаются в замене и обеспечивают работу солнечных батарей в рабочем диапазоне температур, предохраняя их от токовой (тепловой) перегрузки.

Вместе с тем, однако, необходимо отметить следующее. Температура начала фазового перехода (срабатывания) наиболее распространенных в настоящее время типов коммерческих РРТС-предохранителей составляет око-

ло 80°C, а существенное изменение сопротивления наблюдается при более высоких температурах. При этом максимальная рабочая температура фотоэлектрических модулей не превышает 80°C. Такая ситуация в определенной мере ограничивает широкое использование РРТС-предохранителей как элементов защиты от перегрева, особенно если причина перегрева временная.

Учитывая широкий диапазон параметров (значений тока переключения, сопротивления в высоко- и низкопроводящем состояниях и т.д.) РРТС-предохранителей, полученные результаты можно рассматривать как свидетельство перспективности их использования для защиты компонентов солнечных батарей в случаях короткого замыкания или перегрузки по току, приводящих к перегревам различного типа и другим нештатным ситуациям. С другой стороны, представляется перспективным использование применяемых в них полимерных нанодуглеродных композитов в качестве изоляции поврежденных (деградировавших) локальных областей PV-элементов. В этом направлении представляется наиболее важной разработка ленточных РРТС-предохранителей с низкой температурой срабатывания.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Honsberg C., Bowden S. Welcome to PVCDDROM [Electronic resource]. – 2017. – Mode access: <http://www.pveducation.org/pvcdrom>.
- Silvestre S., Chouder A. Effects of shadowing on photovoltaic module performance // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2008. – Vol. 16, N 2. – P. 141–149. – <https://doi.org/10.1002/pip.780>
- Tsanakas J. A., Botsaris P. N. An infrared thermographic approach as a hot-spot detection tool for photovoltaic modules using image histogram and line profile analysis // International Journal of Condition Monitoring. – 2012. – Vol. 2, N 1. – P. 22–30. – <https://doi.org/10.1784/204764212800028842>
- Silvestre S., Boronat A., Chouder A. Study of bypass diodes configuration on PV modules // Applied Energy. – 2009. – Vol. 86, iss. 9. – P. 1632–1640. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.020>
- Ji Eun Lee, Soohyun Bae, Wonwook Oh et al. Investigation of damage caused by partial shading of CuIn<sub>x</sub>Ga<sub>(1-x)</sub>Se<sub>2</sub> photovoltaic modules with bypass diodes // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2016. – Vol. 24, iss. 8. – P. 1035–1043. – <https://doi.org/10.1002/pip.2738>
- Karatepe E., Boztepe M., Colak M. Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells // Solar Energy. – 2007. – Vol. 81, iss. 8. – P. 977–992. – <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.001>
- Kurtz S., Whitfield K., Tamizh Mani G. et al. Evaluation of high-temperature exposure of photovoltaic modules // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2011. – Vol. 19, iss. 8. – P. 954–965. – <https://doi.org/10.1002/pip.1103>
- Зезин Д. А. Деградационные процессы в тонкопленочных солнечных элементах / Дис. ... канд. техн. наук. – Москва: Нац. иссл. ун-т «МЭИ», 2014.
- Трусов В.А., Гусев А.М. Элементы защиты электрических цепей от перенапряжений и сверхтоков // Тр. Междунар. симпозиума «Надежность и качество». – 2011. – Т. 2. – С. 221–224.
- Гавриков В. Самовосстанавливающиеся РТС-предохранители для защиты от токовых перегрузок // Новости электроники. – 2014. – № 12. – С. 11–15.
- Pat. 5963019 USA. Battery pack with battery protection circuit / Kyung-Yong Cheon. – 05.10.99.
- Pat. 6608470 USA. Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries / J. W. Oglesbee, A. G. Burns. – 19.08.03.
- Pat. 6282072 USA. Electrical devices having a polymer PTC array. / A. D. Minervini, T. K. Nguyen. – 28.08.01.
- Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries [Electronic resource]: Littelfuse, Inc. – 2017. – Mode access: [http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application\\_notes/littelfuse\\_protecting\\_rechargeable\\_li\\_ion\\_and\\_li\\_polymer\\_batteries\\_in\\_consumer\\_portable\\_electronics\\_application\\_note.pdf.pdf](http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/littelfuse_protecting_rechargeable_li_ion_and_li_polymer_batteries_in_consumer_portable_electronics_application_note.pdf.pdf)
- Pat. 4973936 USA. Thermal switch disc for short circuit protection of batteries / E. C. Dimpault-Darcy, B. J. Bragg. – 27.11.90.
- Каминская Т. П., Домкин К. И. Самовосстанавливающиеся предохранители для автомобильной электроники // Электронные компоненты. – 2008. – № 5. – С. 80–82.
- Тонкошкур О. С., Игнаткин В. У. Фізичні основи електричного контролю неоднорідних систем: навчальний посібник. – Дніпродзержинськ: Дніпродзержинський державний технічний університет, 2010.
- Хухтиков С. «Восстановить работоспособность!». Самовосстанавливающиеся РРТС-предохранители MultiFuse // Новости электроники. – 2015. – № 1. – С. 37–41.
- Самовосстанавливающиеся предохранители [Электронный ресурс]: Terraелектроника. – 2018. – Режим доступа: <https://www.terraelektronika.ru/catalog/samovosstanavlivayuschiesya-predohraniteli-1522> [Self-healing fuses [Electronic resource]: Terraelektronika. – 2018.
- Application note. Polyswitch strap devices. Help protect rechargeable battery packs [Electronic resource] / Tyco Electronics Corporation, 2008. – Mode access: [https://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Tyco\\_8004/PDF/TE\\_Strap\\_Device.pdf](https://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Tyco_8004/PDF/TE_Strap_Device.pdf)
- Накашидзе Л. В., Кныш Л. И. Методология определения состава и схемных решений солнечных фотоэлектрических установок // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 10 (57). – С. 100–104.
- Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов. – Москва: Наука, 1985.
- Jim Toth. PolySwitch PPTC device principals of operation [Electronic resource]. – Mode access: <http://studyres.com/doc/7802565/polyswitch-pptc-device-principals-of-operation?page=5>
- Белых С. Новый инновационный самовосстанавливающийся компонент защиты для силовых литий-ионных аккумуляторов // Компоненты и технологии. – 2011. – № 2. – С. 50–53.

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 09.02 2017 г.*

О. С. ТОНКОШКУР, О. В. ИВАНЧЕНКО, Л. В. НАКАШИДЗЕ, С. В. МАЗУРИК

Україна, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

## ВИКОРИСТАННЯ САМОВІДНОВЛЮВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАХИСТУ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

*Прояв і утворення в процесі експлуатації в реальних фотоелектричних елементах і їх з'єднаннях різних дефектів, а також їхня робота в режимі мінливої неоднорідної освітленості призводять до так званих невідповідностей (відмінності електричних характеристик) між окремими елементами і групами елементів. Через це виникають їхні локальні перегріву й інтенсифікуються процеси деградації.*

*З метою збільшення терміну служби сонячної батареї у ряді випадків представляється доцільним тимчасове відключення (ізоляція) відповідних її елементів.*

*У даній роботі пропонується використовувати додаткові пристрої для ізоляції перегрітих елементів (і/або компонентів) сонячних батарей — самовідновлювані запобіжники типу «PolySwith». Ці структури являють собою полімерні композити з нанорозмірними вуглецевими наповнювачами. Їх базова функціональна властивість — стрибкоподібне збільшення електричного опору на кілька порядків за досягнення деякої граничної температури і повернення у вихідний високопровідний стан при зниженні температури.*

*Досліджено можливості застосування запобіжників указанного типу для ізоляції «перегрітих» фотоелектричних елементів. Основну увагу приділено вивченню впливу запобіжників на роботу сонячної батареї в робочому діапазоні температур та їхньої функціональної придатності в позаштатних ситуаціях, пов'язаних з перегрівом.*

*Дослідження проведені з використанням моделі структури, що представляє собою паралельне з'єднання декількох послідовно включених фотоелектричних елементів і зазначених запобіжників. Проаналізовано вплив на роботу такої структури температури навколишнього середовища та дрейфу опору запобіжників у провідному стані в процесі їхнього багаторазового спрацьовування.*

*Установлено, що запропоновані елементи захисту не впливають на роботу сонячних батарей у робочому діапазоні температур і є функціонально придатними для електричної ізоляції локальних областей і компонентів сонячних батарей з підвищеною температурою.*

*Ключові слова: самовідновлюваний запобіжник, полімерний наноккомпозит, фотоелектричний елемент, вольт-амперна характеристика, крива потужності, перегрів.*

DOI: 10.15222/ТКЕА2018.1.43  
UDC 621.31

A. S. TONKOSHKUR, A. V. IVANCHENKO,  
L. V. NAKASHYDZE, S. V. MAZURIK

Ukraine, Oles Honchar Dnipro National University  
E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

## APPLICATION OF RESETTABLE ELEMENTS FOR ELECTRICAL PROTECTION OF SOLAR BATTERIES

*The manifestation and formation of various defects in the process of exploitation in real photovoltaic cells and their compounds as well as their work in the regime of changing non-uniform illumination lead to the so-called series and parallel inconsistencies (differences of electrical characteristics) between separate cells and their groups. This results in local overheating and intensifying of degradation processes.*

*In some cases temporary disconnection (isolation) of the corresponding elements of the solar batteries is more appropriate in order to increase their service life.*

*In this work additional devices for insulation of overheating cells (and/or components) of solar batteries such as «PolySwith» resettable fuses are proposed to be used as a perspective solution of such problems. These structures are polymer composites with nanosized carbon fillers. Electrical resistance of such a fuse increases abruptly by several orders of magnitude when certain threshold temperature is reached, and when the temperature decreases the fuse returns to its initial high-conductivity state.*

*This study investigates the possibilities of using the specified type of fuses for electrical insulation of «overheated» photovoltaic cells. Particular attention is paid to the research of the effect of fuses on the working of the solar batteries in the operating temperature range and their functional applicability in emergency situations associated with overheating. The studies were carried out using a model structure of several series of parallel connected photovoltaic cells and specified fuses. Attention is paid to the influence of such factors as the ambient temperature and the drift of the fuses resistance in the conducting state in the process their multiple switching.*

*It has been established that such protection elements do not influence the work of solar batteries in operating temperature range and are functionally applicable for the electrical isolation of local regions and components of solar batteries with increased temperature.*

*Keywords: resettable fuse, polymer nanocomposite, photovoltaic cell, current-voltage characteristics, power curve, overheating.*

## REFERENCES

- Honsberg C., Bowden S. *Welcome to PVCDROM* [Electronic resource]. 2017, mode access: <http://www.pveducation.org/pvcdrom>
- Silvestre S., Chouder A. Effects of shadowing on photovoltaic module performance. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2008, vol. 16, no. 2, pp. 141-149. <https://doi.org/10.1002/pip.780>
- Tsanakas J. A., Botsaris P. N. An infrared thermographic approach as a hot-spot detection tool for photovoltaic modules using image histogram and line profile analysis. *International Journal of Condition Monitoring*, 2012, vol. 2, no. 1, pp. 22-30. <https://doi.org/10.1784/204764212800028842>
- Silvestre S., Boronat A., Chouder A. Study of bypass diodes configuration on PV modules. *Applied Energy*, 2009, vol. 86, iss. 9, pp. 1632-1640. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.020>
- Ji Eun Lee, Soohyun Bae, Wonwook Oh, Hyomin Park, Soo Min Kim, Dongho Lee, Junggyu Nam, Chan Bin Mo, Dongseop Kim, JungYup Yang, Yoonmook Kang, Hae-seok Lee, Donghwan Kim. Investigation of damage caused by partial shading of  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$  photovoltaic modules with bypass diodes. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2016, vol. 24, iss. 8, pp. 1035-1043. <https://doi.org/10.1002/pip.2738>
- Karatepe E., Boztepe M., Colak M. Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells. *Solar Energy*, 2007, vol. 81, iss. 8, pp. 977-992. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.001>
- Kurtz S., Whitfield K., Tamizhmani G., Koehl M., Miller D, Joyce J., Wohlgemuth J., Bosco N., Kempe M., Zgonena T. Evaluation of high-temperature exposure of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011, vol. 19, iss. 8, pp. 954-965. <https://doi.org/10.1002/pip.1103>
- Zezin D. A. *Dis. kand. tekhn. nauk* [Degradation processes in thin-film solar cells]. Moscow, 2014, 129 p. (Rus)
- Trusov V.A., Gusev A.M. [Elements of protection of electrical circuits against overvoltages and overcurrents]. *Proc. of Int. Symp. "Reliability and Quality"*, 2011, vol. 2. pp. 221-224 (Rus)
- Gavrikov V. [Self-healing PTC fuses for protection of current overload]. *Novosti Elektroniki*, 2014, no. 12, pp. 11-15. (Rus)
- Kyung-Yong Cheon. *Battery pack with battery protection circuit*. Pat. USA no. 5963019, 1999.
- J. W. Oglesbee, A. G. Burns. *Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries*. Pat. USA, no. 6608470, 2003.
- A. D. Minervini, T. K. Nguyen. *Electrical devices having a polymer PTC array*. Pat. USA, no. 6282072, 2001.
- Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries* [Electronic resource]: Littelfuse, Inc., 2017, mode access: [http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application\\_notes/littelfuse\\_protecting\\_rechargeable\\_li\\_ion\\_and\\_li\\_polymer\\_batteries\\_in\\_consumer\\_portable\\_electronics\\_application\\_note.pdf.pdf](http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/littelfuse_protecting_rechargeable_li_ion_and_li_polymer_batteries_in_consumer_portable_electronics_application_note.pdf.pdf)
- E. C. Dimpault-Darcy, B. J. Bragg. *Thermal switch disc for short circuit protection of batteries*. Pat. USA, no. 4973936, 1990.
- Kaminskaya T. P., Domkin K. I. [Self-healing fuses for automotive electronics]. *Elektronnyye komponenty*, 2008, no. 5, pp. 80-82. (Rus)
- Tonkoshkur O. S., Ignatkin V. U. *Fizichni osnovi elektrichnogo kontrolyu neodnorodnikh sistem* [Physical bases of electrical control of inhomogeneous systems: educational textbook]. Dniprodzerzhynsk State Technical University, 2010, 290 p. (Ukr)
- Khukhtikov S. [Restore working capacity! ». Self-healing PPTC-fuses MultiFuse]. *Novosti Elektroniki*, 2015, no. 1, pp. 37-41. (Rus)
- [Self-healing fuses [Electronic resource]: Terraelektronika], 2018, mode access: <https://www.terraelektronika.ru/catalog/samovosstanavlivayuschiesya-predohraniteli-1522> (Rus)
- Application note. *Polyswitch strap devices. Help protect rechargeable battery packs* [Electronic resource]. Tyco Electronics Corporation, 2008, mode access: [https://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Tyco\\_8004/PDF/TE\\_Strap\\_Device.pdf](https://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Tyco_8004/PDF/TE_Strap_Device.pdf)
- Nakashidze L. V., Knyshe L. I. [Methodology for determining the composition and circuit design of solar photovoltaic equipments]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, no. 10 (57), pp. 100-104. (Rus)
- Koltun M. M. *Optika i metrologiya solnechnykh elementov* [Optics and metrology of solar elements]. Moscow, Nauka, 1985, 280 p. (Rus)
- Jim Toth. *PolySwitch PPTC device principals of operation* [Electronic resource], mode access: <http://studyres.com/doc/7802565/polyswitch-pptc-device-principals-of-operation?page=5>
- Belykh S. [New innovative self-healing protection component for power lithium-ion accumulators]. *Components & Technologies*, 2011, no. 2, pp. 50-53. (Rus)

УДК 001+621.372

К. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО, к. т. н. В. М. ЧМИЛЬ

Украина, г. Киев, НПП «Сатурн»

E-mail: chmil@nbi.com.ua, gen-nto@ukr.net

## ВСЕГДА НА ПЕРЕДОВЫХ РУБЕЖАХ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ (к 50-летию НИИ «Сатурн»)

*Статья посвящена Научно-производственному предприятию «Сатурн» — от момента создания до сегодняшних дней. Описаны определяющие этапы его развития и научно-технические результаты, достигнутые коллективом на протяжении 50-летней истории предприятия.*

*Ключевые слова:* НПП «Сатурн», СВЧ-устройства, системы спутниковой связи, арсенид-галлиевые радиоэлементы.

50 лет тому назад в марте 1968 года в соответствии с Распоряжением Совета Министров СССР и приказами Министра электронной промышленности СССР в Киеве был создан научно-исследовательский институт криогенной электроники (НИИ КЭ).

В 1960-е годы возникла острая необходимость в разработке сверхчувствительных (малощумящих) приемо-усилительных систем и устройств СВЧ-диапазона, наиболее пригодных для решения задач дальней космической связи, телевизионного вещания через искусственные спутники Земли, радиоастрономии и новейших видов систем вооружения. Тогда же были выявлены и изучены эффекты при глубоком (криогенном) охлаждении твердых тел, обеспечивающие возможность разработки криоэлектронных приемоусилительных систем СВЧ-диапазона с существенно уменьшенными собственными шумами. Именно эти факторы и предопределили необходимость создания научно-исследовательского института, специализирующегося на криогенной электронике.

Официальным днем рождения НИИ КЭ принято считать 25 июня 1968 года, когда к выполнению обязанностей директора приступил Владимир Николаевич Алфеев.

Основным направлением работ НИИ КЭ были определены разработка и организация производства сверхчувствительных (малощумящих) систем и устройств СВЧ-диапазона, не уступающих по своим параметрам зарубежным аналогам или же превосходящих их за счет использования глубокого, криогенного охлаждения.

С этой задачей молодой (и в основном молодежный) коллектив НИИ КЭ успешно справился — уже в 1969 году выполнил пятнадцать уникальных разработок: две ОКР, одну поисковую НИР и двенадцать НИР. При этом сотрудники еще и активно участвовали в строительстве производственных корпусов института.

Подобный результат был следствием правильно выбранной кадровой политики администрации — вместе с приглашенными из разных научных центров СССР опытными специалистами разработки выполняли вчерашние выпускники ведущих вузов: Киевского и Харьковского государственных университетов, ХНУРЭ, КПИ и других. Важнейшим фактором оказалось также активное взаимодействие с известными научными коллективами страны, в первую очередь ИРЭ АН УССР, ИК АН УССР, ФТИНТ (Харьков), НИИ МД (Ленинград) и многие другие. Именно такой симбиоз и обеспечил успешное выполнение задач, поставленных перед коллективом института при его создании.

Следует отметить, что за прошедшие 50 лет наименование института претерпело ряд изменений (НИИ КЭ — НИИ «Сатурн» — НПО «Сатурн» — ОАО «НПП «Сатурн» — ПАО «НПП «Сатурн» — ЧАО «НПП «Сатурн»), но это был все тот же «Сатурн». Не менялись и стоящие перед «Сатурном» задачи, главной из которых было оставаться на передовых рубежах современной СВЧ-электроники.

Такому состоянию в немалой степени способствовало исключительно плодотворное многолетнее сотрудничество и взаимодействие с факультетом электроники НГУУ «КПИ» имени

Игоря Сикорского. Олицетворением и наиболее активным организатором этого процесса был и остается доцент Николай Николаевич Кобак — ряд его подопечных до сих пор трудятся на «Сатурне» (например, директор дочернего предприятия Н. Н. Бердар, начальник НИЛ П. А. Яцык). Принципиальным в сложившемся сотрудничестве было то, что знакомство студентов с современными электронными технологиями начиналось еще на третьем курсе во время ознакомительной практики, а заканчивалось в большинстве случаев защитой диплома по тематике работ «Сатурна». Соответственно, «Сатурн» постоянно пополнялся подготовленными квалифицированными специалистами.

Общеизвестно, что практически невозможно создать современную радиоэлектронную аппаратуру на базе серийных компонентов, не превосходящих по своим характеристикам массово используемые. Поэтому на «Сатурне», который в 1974 году возглавил Л. Г. Гассанов, стало правилом: для достижения заданных улучшенных характеристик разрабатываемой современной аппаратуры необходимо организовывать и развивать новые научные направления и технологии.

За все годы на «Сатурне» было создано и развито около 30 новых научных направлений и технологий. Не все они стратегически влияли на уровень и качество разработок предприятия, но на самых значимых имеет смысл остановиться.

Самыми первыми были созданы лаборатории по разработке и внедрению в изделия «Сатурна» смесительных и параметрических диодов, а затем и диодных матриц. Без этих компонентов, заменявших серийные покупные изделия, было невозможно создать современное поколение параметрических усилителей — самых высококачественных СВЧ-устройств в 1960—70-х годах. Это направление постоянно развивалось, и уже в XXI веке был создан смесительный (детекторный) диод для 3-мм диапазона частот с емкостью 0,4 фФ.

После приобретения технологического оборудования для диодных технологий было принято решение дополнить технологическую базу оборудованием для создания малошумящих СВЧ полевых транзисторов. В конечном итоге эта работа привела к революционному результату — замене трудоемких в изготовлении параметрических усилителей транзисторными без ухудшения характеристик устройств. При этом был реализован полный технологический комплекс для работы с полупроводниковыми материалами группы  $A_3B_5$  с блоком прецизионной электронной

литографии, позволяющим создавать топологию с точностью не хуже 0,15 мкм. Подобный технологический комплекс на то время имелся еще всего в пяти странах мира.

В настоящее время трудно себе представить существование СВЧ-радиоэлектронных систем без диэлектроники — различных видов диэлектрических резонаторов, которые применяются для селекции сигналов, стабилизации частоты СВЧ-устройств и снижения их массогабаритов. Такому развитию в 1970-е годы СВЧ-диэлектроника обязана энтузиазму и активной пропагандистской деятельности сотрудников «Сатурна», которые выполнили исследование СВЧ диэлектрических резонаторов и разработку конструктивно-технологических принципов их применения для создания нового класса твердотельных приборов и устройств СВЧ. Эта их научно-практическая деятельность была удостоена Государственной премии Украины в области науки и техники.

В 70-е годы прошлого века главным информационным источником для населения стало телевизионное вещание через искусственные спутники связи (ИСЗ). Для реализации бытового телевидения в труднодоступных районах «Сатурном» была разработана малогабаритная приемная станция спутникового телевидения для диапазона 4 ГГц «Электроника-связь СТВ-4М», выполненная с применением собственных транзисторов, диодов и диэлектрических резонаторов.

В 1975 году во время спецоперации в Иране армия США убедительно доказала преимущества и целесообразность применения мобильных систем связи через ИСЗ, поэтому начатая в 1977 году на «Сатурне» разработка цифровой спутниковой мобильной системы телекоммуникации и связи СКС «Электроника-001» была вполне прогнозируемой. Однако, в отличие от американского одноканального аналога, эта система была семиканальной, и в ней был реализован целый ряд принципиальных новейших решений: компактный транзисторный усилитель мощности передатчика, двухуровневая фазовая манипуляция на несущей частоте (т. е., еще 40 лет назад была обеспечена скорость передачи не менее 512 Кбит), фильтр на ПАВ на германате висмута, сжимающий информационный сигнал с базой 31. Именно эти отличия обеспечивали работу системы с кодированным и сжатым в 1000 раз информационным сигналом, т. е. конфиденциальный режим связи на уровне ниже шумов.

Важнейшим научно-практическим направлением «Сатурна» является обеспечение наземной

инфраструктуры космической отрасли — радиоастрономия с радиометрией. Разработанными на «Сатурне» криоэлектронными радиометрическими системами с превышающими зарубежные аналоги параметрами оснащены все радиотелескопы СССР, включая РАТАН (Зеленчук), РТ-22 (Симеиз) и РТ-70 (Евпатория). Качество и надежность изделий «Сатурна» предопределили успех дальней космической связи при реализации таких глобальных проектов, как «Венера-15», «Венера-16» и «Вега» (международный проект «Венера — комета Галлея»).

Еще одним успешным направлением практической деятельности «Сатурна» является создание медико-биологической аппаратуры. Это в первую очередь система информационно-волновой терапии миллиметрового диапазона «Электроника КВЧ» и изделие для профилактики желудочно-кишечного тракта «Струмок». А система «Криоэлектроника-2» для криохирургии и гинекологии до настоящего времени применяется как в отечественных, так и в зарубежных клиниках. Во многих животноводческих хозяйствах успешно использовалась аппаратура криостатирования для долгосрочного хранения биологических материалов.

Успешное, своевременное и качественное выполнение заданий по созданию и производству современных радиоэлектронных систем устройств было по достоинству отмечено руководством страны. В 1986 году за разработку и организацию производства изделий специального назначения «Сатурн» был награжден орденом Трудового Красного Знамени. Были отмечены наградами и многие сотрудники предприятия — 66 человек награждены орденами, а 68 — медалями.

Научно-практическая деятельность «Сатурна» также не осталась без внимания: его сотрудники в составе шести коллективов ученых были удостоены Государственной премии СССР, а также в составе девяти научных коллективов — Государственной премии Украины.

В процессе выполнения производственных заданий сотрудниками проводились серьезные научные исследования, по результатам которых были оформлены и успешно защищены докторские диссертации Л. Г. Гассановым, В. И. Поповым, Б. В. Ткачуком, К. С. Сундучковым и А. И. Семенко. Кроме того, более 50 сотрудников «Сатурна» защитили кандидатские диссертации.

Развал СССР отразился на работе «Сатурна» как в экономическом, так и в организацион-

ном плане, и с 1991 года бремя руководства «Сатурном» взял на себя В. М. Чмиль. Были нарушены многолетние производственные связи, сузился круг потенциальных заказчиков. Произошло переподчинение «Сатурна» украинскому ведомству, ответственному за электронную и специальную тематику.

В тот же период времени «Сатурн» был преобразован в акционерное общество. Претерпела изменения и структура «Сатурна» — организованы дочерние предприятия (ПНДП «ЭлисаТ», ПНДП «Сатмаш»), научно-исследовательский центр (НИЦ), производственная служба, служба контроля и качества и другие. Однако это практически не отразилось на развитии основного направления деятельности предприятия.

В связи с уменьшением потребности в странах СНГ в изделиях СВЧ-электроники «Сатурн» переориентировался на рынки Китая и Ирана. Менее успешным, к большому сожалению, оказалось внедрение в рынки Европы и Америки. Хотя следует отметить, что имели место поставки в США отдельных СВЧ-устройств для их космического агентства НАСА.

В интересах ряда китайских предприятий была проведена разработка комплекта приемопередающих устройств Ку- и Ка-диапазонов для станций спутниковой связи (входной конвертор, приемник, усилитель мощности), комплект входных устройств для станций тропосферной связи. Особо следует отметить разработку приемного устройства и комплекса в целом для контроля наличия предметов под одеждой человека в интересах таможенных служб и служб по борьбе с международным терроризмом, а также целый ряд других изделий. Все упомянутые изделия были освоены при непосредственном участии специалистов «Сатурна» в процессе производстве на предприятиях Китая.

В Иран по заказу их комитета по радио и телевидению было поставлено более 30 комплектов переносных репортажных радиорелейных станций.

Не прекращалось, хотя и уменьшилось в объемах, сотрудничество со странами СНГ. Так, например, для Российской Федерации в рамках международной программы «Радиоастрон» (вывод на орбиту радиотелескопа) радиотелескопы в Светлом, Бадарах и Зеленчуке были дооснащены входными сверхмалощумящими усилительными устройствами, которые успешно эксплуатируются до сих пор. Следует также отметить участие «Сатурна» в создании сети новых радиотелескопов РФ в рамках международной

программы VLBI, где нашим предприятием был разработан и поставлен трехдиапазонный (S-, Ku- и Ka-диапазонов) приемный коиплекс.

Также для предприятий РФ «Сатурн» разработал и внедрил в производство приемопередатчики миллиметрового диапазона длин волн для радиолокационных станций берегового обзора.

За цикл работ в интересах РФ В. М. Чмиль награжден Орденом Дружбы РФ.

И в других странах СНГ, например в Казахстане и Туркмении, успешно эксплуатируются СВЧ-устройства, созданные «Сатурном» по заказу их национальных комитетов по радио и телевидению.

Не прекращалось сотрудничество «Сатурна» с предприятиями и организациями Украины — в первую очередь с Государственным космическим агентством (ГКА) Украины. Так в 2012–2013 годах были модернизированы приемные устройства антенного комплекса радиотелескопа РТ-70 в Евпатории. Проводились работы по переоснащению приемными устройствами центров по управлению и наблюдению за космическими объектами в Дунаевцах и Евпатории. Сегодня насущной задачей является переоснащение антенных комплексов в Золочеве Львовской области с целью вхождения ГКА Украины в качестве участника в различные программы Европейского Космического Агентства.

Структурными подразделениями «Сатурна» выполнялись и другие важные работы. Так, например, дочернее предприятие «Элилат» в последние годы активно занималось разработкой и изготовлением аппаратуры для цифровых тропосферных радиорелейных станций (ЦТРС), формировательно-приемной аппаратуры радиолокационных станций (РЛС) и аппаратуры для систем радиоразведки. За период с 2007 до 2012 года предприятием была разработана, изготовлена и поставлена аппаратура для ЦТРС Р-417 МУ и ЦТРС Р-423-1М, в состав которой входило приемопередающее оборудование, аппаратура управления и контроля, модемное оборудование и малошумящие усилители.

Высокая чувствительность разработанной аппаратуры ЦТРС (соотношение сигнал/шум составляет минус 7 дБ на скорости 512 Кбит/с; минус 3 дБ на скорости 1024 Кбит/с; 0 дБ на скорости 2048 Кбит/с) позволяет строить линии связи длиной более 200 км. Все модернизи-

рованные ЦТРС активно эксплуатировались в зоне проведения АТО.

Работы по модернизации РЛС проводились в двух направлениях:

- разработка и изготовление приемной аппаратуры для некогерентных РЛС с использованием штатных импульсных передатчиков;
- разработка и изготовление формировательно-приемной аппаратуры для когерентных РЛС с использованием твердотельных передатчиков.

Приемная аппаратура была разработана и поставлена для некогерентных РЛС П-14 и П-18, а формировательно-приемная аппаратура — для когерентных РЛС П-18.

Модернизированные когерентные станции П-18, обеспечивая подавление активных и пассивных потерь, позволяют обнаруживать и сопровождать воздушные цели на расстояниях более 400 км, что превышает дальность аналогичных станций других производителей.

Во многих станциях радиоразведки и радиомониторинга общегражданского и специального назначения, используемых потребителями Украины, а также за рубежом, применяются входные устройства, разработанные и изготовленные ПНДП «Элилат». Такие устройства позволяют проводить пеленгацию радиоизлучающих устройств, снимать информацию со спутниковых и радиорелейных систем связи для последующего ее декодирования.

Подразделения «Сатурна» также проводят поставки СВЧ-комплектующих и оказывают различные услуги (например, нанесение гальванопокрытий и полный цикл испытаний аппаратуры) практически всем предприятиям Украины, работающим в области создания радиоэлектронных устройств.

Как «Сатурн» в целом, так и отдельные его сотрудники за выполнение работ по государственным программам награждены грамотами и именными наградами Верховной Рады Украины, грамотами Кабинета Министров и Государственного космического агентства Украины, а Чмиль В.М. в составе научного коллектива удостоен звания Лауреата Государственной премии Украины в области науки и техники.

Изделия «Сатурна» попрежнему конкурентоспособны и не уступают уровню зарубежных аналогов, а само предприятие, как и прежде, остается среди лидеров отечественной СВЧ-электроники.

## УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2017 г.

### Новые компоненты для электронной аппаратуры

Чувствительный элемент многофункционального датчика для измерения температуры, деформации и магнитного поля. А. А. Дружинин, Ю. Н. Ховерко, А. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуй, С. Ю. Яцухненко (на английском)

6

Дискретные фотоприемники средневолнового ИК-диапазона спектра на основе HgCdTe. З. Ф. Цибрий, Е. В. Андреева, М. В. Апатская, С. Г. Бунчук, Н. В. Вуйчик, А. Г. Голенков, Н. В. Дмитрук, В. В. Забудский, И. А. Лысюк, Е. В. Свеженцова, М. И. Смолий, Ф. Ф. Сизов

6

### Электронные средства: исследования, разработки

Адаптивная электротепловая защита полупроводниковых преобразователей электроэнергии. Г. А. Баранюк, В. А. Тодоренко, А. Ф. Бондаренко (на украинском)

3

Модели печатных плат для непаяного монтажа электронных компонентов методом прокола фольги. А. А. Ефименко, Б. П. Палюх

4–5

Моделирование структуры чувствительного элемента магниторезистивного преобразователя. Ю. Ф. Зиньковский, А. И. Вытяганец (на украинском)

4–5

Применение дилатометрического эффекта для автоматизации контактной сварки. А. Ф. Бондаренко, А. Г. Дубко, В. М. Сидорец, Ю. В. Бондаренко (на украинском)

6

### СВЧ-техника

Определение технологических параметров изготовления керамических опор замедляющей системы ЛБВ. В. С. Предмирский, Н. Г. Твердохлеб

1–2

Проектирование микрополосковых СВЧ-фазовращателей для антенных решеток. Э. Н. Глушеченко

3

### Системы передачи и обработки сигналов

Повышение точности измерения напряжения негармонического сигнала в условиях аддитивной помехи. И. В. Горбатый (на украинском)

1–2

Аппаратно-программная реализация системы сбора данных для импульсного спектрометра ЯКР. А. П. Самила (на украинском)

1–2

Имитатор сигналов для индикатора кругового обзора «Пикет». И. В. Цевух, А. Н. Шейк-Сейкин, А. В. Садченко, О. А. Кушниренко, Ю. А. Савчук

3

Корреляционная схема кадровой синхронизации в системах связи с QPSK-модуляцией. А. В. Садченко, О. А. Кушниренко, О. И. Ефимов, В. В. Пунько, С. Ю. Паровой

6

### Энергетическая электроника

Балансировка напряжения модульного накопителя энергии источника питания для контактной микросварки. Ю. В. Кожушко, А. Ф. Бондаренко (на украинском)

4–5

### Сенсоэлектроника

Исследование электрических и магнитных характеристик высокотемпературных датчиков Холла на основе гетеро-структуры AlGaIn/GaN. В. Р. Стемпицкий, Дао Динь Ха

1–2

Чувствительный элемент двухфункционального сенсора магнитного поля и деформации на основе микрокристаллов Si<B, Ni>. А. А. Дружинин, Ю. Н. Ховерко, А. П. Кутраков, Р. Н. Корецкий, С. Ю. Яцухненко (на украинском)

3

### Функциональная микро- и наноэлектроника

ПЗС-фотоматрицы с электронным умножением. В. П. Рева, С. В. Коринец, А. Г. Голенков, С. В. Сапон, А. М. Торчинский, В. В. Забудский, Ф. Ф. Сизов

1–2

Влияние разброса значений электрических параметров RGB-светодиодов на однородность свечения светодиодных экранов при минимальной градации яркости. *В. П. Велещук, А. И. Власенко, З. К. Власенко, В. В. Шинкаренко, Я. Я. Кудрик, П. О. Сай, В. В. Борщ*

3

**Биомедицинская электроника**

Генератор для электротерапии и стимуляции нервных центров человека. *В. Е. Бабелюк, Ю. Г. Добровольский, И. Л. Попович, И. Г. Корсунский*

1–2

Термоэлектрический прибор с электронным блоком управления для диагностики воспалительных процессов организма человека. *Л. И. Анатычук, Р. Р. Кобылянский, Р. Г. Черкез, И. А. Константинович, В. И. Гошовский, В. А. Тюменцев* (на английском)

6

**Обеспечение тепловых режимов**

Критериальный подход к поиску токовых режимов работы термоэлектрических устройств повышенной надежности. *В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, Ю. И. Журавлёв*

1–2

Влияние основных ограничивающих факторов на пределы теплопереноса в тепловых трубах с различными теплоносителями. *Р. С. Мельник, Ю. Е. Николаенко, В. Ю. Кравец, Е. С. Алексеик*

1–2

Теплоаккумулирующая панель для поддержания микроклимата в помещении с радиоэлектронным оборудованием. *В. Е. Трофимов*

3

Термическое сопротивление алюминиевой гравитационной тепловой трубы с резьбовой капиллярной структурой. *Ю. Е. Николаенко, Д. В. Козак*

4–5

Сравнительный анализ основных параметров и показателей надежности двухкаскадных ТЭУ с различной геометрией ветвей термоэлементов в различных режимах работы. *В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, Ю. И. Журавлёв*

4–5

Конструктивно-технологические особенности имитатора теплового потока на основе алмазоподобных пленок. *Ю. Е. Николаенко, Р. С. Мельник, А. И. Руденко, С. М. Ротнер* (на английском)

6

**Технологические процессы и оборудование**

Получение высокочистых гранулированных металлов: кадмия, цинка, свинца. *А. П. Щербань, Г. П. Ковтун, Ю. В. Горбенко, Д. А. Солопихин, В. Д. Вирич, Л. А. Пироженко*

1–2

**Материалы электроники**

Влияние электронного облучения на оптические свойства пленок нанокристаллического SiC на подложках из монокристалла Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *А. В. Семенов, А. В. Лопин, В. Н. Борискин*

3

Исследование влияния кислорода на скорость и анизотропию глубинного травления кремния в плазмохимическом реакторе с управляемым магнитным полем. *В. В. Гладковский, О. А. Федорович*

4–5

Пассивация поверхности высокочистых гранулированных металлов: цинка, кадмия, свинца. *Л. А. Пироженко, С. С. Пояркова, А. П. Щербань, Ю. В. Горбенко, А. В. Рыбка*

4–5

Углеродные наностенки в автоэмиссионных катодах. *А. Ф. Белянин, В. В. Борисов, С. А. Дагесян, С. А. Евлашин, А. А. Пилевский, В. А. Самородов* (на английском)

6

**Метрология. Стандартизация**

Применение энтропийного коэффициента для оптимизации числа интервалов при интервальных оценках. *А. Н. Тыныныка*

3

Способ экспресс-оценки октанового числа бензина с использованием портативного спектроимпедансного измерителя и методов статистического анализа. *А. В. Мамыкин, А. Л. Кукла, А. С. Майстренко, Е. П. Мацас, Л. М. Матвиенко*

4–5

**К истории науки и техники**

НПП «Электрон-Карат» — 45 лет успеха. *Н. М. Вакив, И. М. Сыворотка, А. М. Булат*

4–5

**Библиография**

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2016 г.

1–2

## РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

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

*Михайлов Сергей Ростиславович*, канд. техн. наук, доцент, НТУУ «Киевский  
политехнический институт имени Игоря Сикорского»

*Невлюдов Игорь Шакирович*, докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой,  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

*Николаенко Юрий Егорович*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник,  
НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

*Перевертайло Владимир Леонтьевич*, канд. физ.-мат. наук, зам. директора  
по научной работе, НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАНУ, г. Киев

*Петлицкая Татьяна Владимировна*, канд. техн. наук, начальник сектора,  
ОАО «ИНТЕГРАЛ», г. Минск

*Сафронов Павел Сергеевич*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный  
политехнический университет

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

*Шпотюк Олег Иосифович*, докт. физ.-мат. наук, зам. ген.директора по науч-  
ной работе, НПП «Электрон-Карат», г. Львов

---

1. К рассмотрению принимаются статьи прикладной направленности на русском, украинском или английском языке, которые не были опубликованы ранее и не переданы для публикации в другие издания.

2. В журнале публикуются научно-практические и экспериментальные работы по тематическим направлениям, с которыми можно ознакомиться 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.

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 50 до 100 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  $A$  от  $B$ . Из рисунка видно, что при возрастании  $B$  значение  $A$  монотонно уменьшается.», следует дать пояснение типа «Как видно из рис. 1, при возрастании  $B$  значение  $A$  монотонно уменьшается, что свидетельствует о том, что ...»;

– выводы (заключение) не должны повторять аннотацию – в них нужно привести результаты работы (а не краткое содержание статьи). Правильно сформулировать выводы помогут такие фразы, как «Проведенное исследование показало, что ...», «Разработанная методика позволяет ...», «Авторами установлено, что...» и др.

9. Список «Использованные источники» (образец см. на сайте) формируется в порядке их упоминания в тексте.

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 использование программ типа MathType допускается только в тех случаях, когда Word бессилён, 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. С точки зрения удобства верстки желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% от общего объема статьи.

15. В начале статьи, кроме ее названия и информации об авторах (ФИО, ученые степени, место работы, e-mail), необходимо указать ее индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК).

16. Материалы статьи направляются по e-mail <tkea@optima.com.ua>. В тексте письма нужно указать ФИО авторов, название статьи и соответствующее тематическое направление (см. п. 2), а к письму прикрепить подписанные Авторское соглашение и Карточки автора (см. на сайте).

17. При цитировании статей из журнала «ТКЭА» его название на латинице должно быть представлено транслитерацией, а именно: «Tekhnologiya i Konstruivovanie v Elektronnoi Apparature».

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

ДЕВЯТНАДЦАТАЯ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



## СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

28 мая – 1 июня 2018 года  
Украина, г. Одесса

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

- Информационные и компьютерные системы и технологии
- Системы защиты информации
- Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств
- Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии

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



*Номер готовили  
Варшава, Днепр, Киев, Львов,  
Минск, Одесса, Харьков.*



Пишите  
Подписывайтесь  
Читайте