

# ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

ДВАДЦАТА МІЖНАРОДНА  
НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ




## СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТА ЕЛЕКТРОННІ ТЕХНОЛОГІЇ

27–31 травня 2019 року  
Україна, м. Одеса

Реквізити для зв'язку  
e-mail <tkea@optima.com.ua>  
тел. +38 (048) 728-49-46.

- Інформаційні технології в електроніці та телекомунікаціях
- Радіотехнічні, телекомунікаційні та телевізійні системи. Захист інформації в широкосмугових системах та комп'ютерних мережах
- Проектування, конструювання, виробництво та контроль електронних засобів
- Функціональна електроніка. Мікро- та нанотехнології

Плановані публікації  
Труди конференції з тезами доповідей  
Збірник доповідей (статей)  
у видавництві Springer 

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

# 5–6 2018

СЕНТЯБРЬ — ДЕКАБРЬ

# 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*

(КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина)

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

*Акад. 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. Чмилъ 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.-кор. 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)728-49-46.

## Редакция

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

## СОДЕРЖАНИЕ

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 № 4 от 18.12 2018 г.)  
Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

**УЧРЕДИТЕЛИ**  
Институт физики полупровод-  
ников им. В. Е. Лашкарёва  
Научно-производственное  
предприятие «Сатурн»  
Одесский национальный  
политехнический университет  
Издательство «Политехпериодика»

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

### Современные электронные технологии

Обнаруживающая способность псевдокольцевых тестов по отношению к динамическим одиночным неисправностям в словоориентированной памяти. *Грицков С. С., Сорокин Г. Ф., Шестакова Т. В.* (на английском) 3

### Электронные средства: исследования, разработки

Рентгеновское излучение, вызванное импульсным лазерным воздействием на опаловые матрицы. *Белянин А. Ф., Борисов В. В., Попов В. В.* (на английском) 10

### Системы передачи и обработки сигналов

Исследование корректирующей способности синхрокодов для модели декодера с согласованной обработкой. *Садченко А. В., Кушниренко О. А., Юркевич А. Г., Севастьянов В. С.* 17

Влияние параметров детектора на эффективность приема радиосигналов со сложной фазовой модуляцией. *Максымив И.П., Алтунин С.И., Бондарев А.П., Горбатый И.В.* (на украинском) 24

### Обеспечение тепловых режимов

CFD-моделирование импактно-струйного радиатора для проведения термотренировки микропроцессоров. *Трофимов В. Е., Павлов А. Л., Сторожук А. С.* 30

### Материалы электроники

Исследование кристаллов  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  и гетеропереходов на их основе. *Ковалюк Т. Т., Майструк Э. В., Солован М. Н., Козьярский И. П., Марьянчук П. Д.* 37

Исследование ширины запрещенной зоны смешанных кристаллов  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ . *Трубаева О. Г., Чайка М. А.* 44

Влияние температуры на оптические свойства тонких пленок  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ . *Майструк Э. В., Козьярский И. П., Козьярский Д. П., Марьянчук П. Д.* (на украинском) 50

### Список рецензентов номера

55

### Памятка для авторов журнала

55

## ЗМІСТ

**Сучасні електронні технології**

Виявляюча здатність псевдокільцевих тестів по відношенню до динамічних одиночних несправностей в словоорієнтованій пам'яті. *Грицьков С. С., Сорокін Р. Ф., Шестакова Т. В.* (3)

**Електронні засоби: дослідження, розробки**

Рентгенівське випромінювання, що викликане імпульсною лазерною дією на опалові матриці. *Белянін А. Ф., Борисов В. В., Попов В. В.* (10)

**Системи передачі та обробки сигналів**

Дослідження коригувальної здатності синхрокодів для моделі декодера з узгодженою обробкою. *Садченко А. В., Кушніренко О. А., Юркевич А. Г., Севаст'янов В. С.* (17)

Вплив параметрів детектора на ефективність приймання радіосигналів зі складною фазовою модуляцією. *Максимів І. П., Алтунін С. І., Бондарев А. П., Горбатий І. В.* (24)

**Забезпечення теплових режимів**

CFD-моделювання імпульсно-струменевого радіатора для проведення термотренування мікропроцесорів. *Трофімов В. Є., Павлов О. Л., Сторожук О. С.* (30)

**Матеріали електроніки**

Дослідження кристалів  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  та гетеропереходів на їхній основі. *Ковалюк Т. Т., Майструк Е. В., Солован М. М., Козярьський І. П., Мар'янчук П. Д.* (37)

Дослідження ширини забороненої зони в змішаних кристалах  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ . *Трубаєва О. Г., Чайка М. А.* (44)

Вплив температури на оптичні властивості тонких плівок  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ . *Майструк Е. В., Козярьський І. П., Козярьський Д. П., Мар'янчук П. Д.* (50)

## CONTENTS

**Modern electronic technologies**

Pseudo-ring tests resolution for dynamic single faults in word-oriented memory. *Gritcov S. S., Sorokin G. F., Shestacova T. V.* (3)

**Electronic devices: research, development**

X-ray radiation during pulsed laser treatment of opal matrices. *Belyanin A. F., Borisov V. V., Popov V. V.* (10)

**Signals transfer and processing systems**

Study of the corrective ability of sync codes for the matched processing decoder. *Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Yurkevych A. G., Sevastianov V. S.* (17)

The influence of detector's parameters on the efficiency of radio signals with complex phase modulation receiving. *Maksymiv I. P., Altunin S. I., Bondariev A. P., Horbatiy I. V.* (24)

**Thermal management**

CFD-simulation of impact jet radiator for thermal testing of microprocessors. *Trofimov V. E., Pavlov A. L., Storozhuk A. S.* (30)

**Materials of electronics**

Study on  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  crystals and heterojunctions on their basis. *Kovaliuk T. T., Maistruk E. V., Solovan M. N., Koziarskyi I. P., Maryanchuk P. D.* (37)

Investigation of band gap width in mixed  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  crystals. *Trubaieva O. G., Chaika M. A.* (44)

Influence of temperature on optical properties of thin films  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ . *Maistruk E. V., Koziarskyi I. P., Koziarskyi D. P., Maryanchuk P. D.* (50)



S. S. GRITCOV, Ph.D. G. F. SOROKIN, Ph.D. T. V. SHESTACOVA

Moldova, Chisinau, Technical University of Moldova

E-mail: gritscov@gmail.com

## PSEUDO-RING TESTS RESOLUTION FOR DYNAMIC SINGLE FAULTS IN WORD-ORIENTED MEMORY

*This paper presents single dynamic faults and methods for their detection. Such dynamic faults as dRDF, dDRDF and dIRF are considered in detail. Also, pseudo-ring testing and the principles of single dynamic faults detecting by pseudo-ring tests are considered. The paper presents the resolution determination results for pseudo-ring tests in relation to these faults in the word-oriented memory. Also, a comparative analysis of the pseudo-ring tests with known March tests is done. The results show that pseudo-ring tests with an algorithmic complexity of  $(30-60)N$ , where  $N$  is the number of all memory cells, can cover from 75 to 100% of all single dynamic faults. This advantage allows using pseudo-ring tests as an alternative to existing classical and March tests.*

**Keywords:** *dynamic single faults, pseudo-ring testing, iteration.*

A lot of projects based on digital processing systems use memory devices for data storing. Using a memory device, we must consider the possibility of faults appearing in this memory. These faults appear because of various defects that occur during the memory device operation [1]. Dynamic faults are a type of faults which can appear in the memory device [2]. To detect them, it is necessary to develop specific tests which are presented in different publications [3, 4]. These tests are March tests. The main idea of March testing is to write a value in every memory cell, read these cells and compare with written value. If there are no faults in memory, read and written values must coincide. A March test represent a sequence of write and read operations of 0 and 1 values in memory cells [5]. For example, March test MATS represent write 0 and read 0 from all memory cells and write 1 and read 1 from all memory cells. As we can see March tests are very simple. A feature of the March tests is the low algorithmic complexity, and as the result — the highest speed of the test execution. Also, March tests have good fault coverage. These advantages account for March tests being used nowadays [6]. On the other hand, March tests have a high hardware complexity.

An alternative testing method is pseudo-ring testing [7]. The main idea of pseudo-ring testing consists in LFSR (Linear Feedback Shift Register) passing through all memory cells and comparing final LFSR state with the expected one, which is described in this paper in more detail. For March test implementation we need to use a data generator for writing 0 and 1 in memory cells and result

analyzer for reading memory cells. In pseudo-ring testing the data generator and result analyzer are merged in one LFSR, which provides a significant hardware resources reducing. Also, pseudo-ring tests can detect dynamic faults in bit-oriented memory [8]. Modern memory is word-oriented and when moving from bit-oriented memory to word-oriented memory, pseudo-ring testing needs changes in LFSR structure and LFSR initial states [9]. It means that new pseudo-ring tests must be determined for word-oriented memory. Only a few examples of pseudo-ring tests for a few static single and coupled faults in word-oriented memory are presented in literature [9, 10], which means that pseudo-ring testing is poorly understood for word-oriented memory and needs more research in this field.

The main purpose of this paper is to determine pseudo-rings tests for word-oriented memory and to determine resolution of these tests for single dynamic faults. Also, it is very important to compare the proposed pseudo-rings tests with the widely used March tests and to analyze algorithmic complexity of these tests and to analyze their resolution, also known as fault coverage.

Single dynamic faults are presented in detail in section 1 of this paper. In section 2 the main idea of the pseudo-ring methods is considered. In section 3 a few pseudo-ring tests for word-oriented memory are proposed, their resolution with respect to single dynamic faults is determined and a comparative analysis of pseudo-ring tests with March tests is carried out.

### 1. Dynamic memory faults

There are large number of faults occurring in memory. The most typical classification of known faults is presented in Fig. 1 [11].

In **Fig. 1** dynamic faults are highlighted. They are usually divided into single dynamic and coupled dynamic faults. Let's consider the single dynamic faults [12].

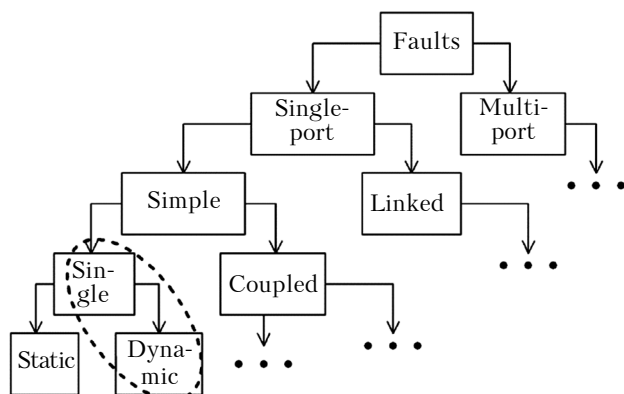


Fig. 1. Typical digital memory faults classification

**Dynamic Read Disturb Faults (dRDF).** A cell has dRDF if a read operation immediately followed by a write operation ( $w0, r0$  or  $w1, r1$ ) in this cell cause an incorrect logical state at the output. There are four types of dRDF ( $0w0r0, 0w1r1, 1w0r0, 1w1r1$ ).

**Dynamic Deceptive Read Disturb Faults (dDRDF).** A cell has dDRDF if a read operation immediately followed by a write operation ( $w0, r0$  or  $w1, r1$ ) in this cell returns the correct logical value, but the content of the cell changes. There are four types of dDRDF.

**Dynamic Incorrect Read Fault (dIRF).** A cell has dIRF if a read operation immediately followed by a write operation ( $w0, r0$  or  $w1, r1$ ) in this cell returns the incorrect logical value, but the content of the cell remains correct. There are four types of dIRF.

To detect these faults, it is necessary to perform certain operations, in this case, perform a read operation, which follows immediately after the write operation to a specific cell. This sequence of operations is performed by default in pseudo-ring testing. Let us consider this type of testing in more detail.

### 2. Pseudo-ring testing and detecting principle for dynamic single faults

Pseudo-ring testing is based on the LFSR (Linear Feedback Shift Register) passage through memory cells. LFSR is a test data generator and result analyzer. In the process of the LFSR passing, the memory cells are overwritten and read, which

ensures the fault detection. To provide higher resolution, unlike pseudo-random testing, the LFSR repeatedly passes through memory cells a certain number of times, which is called iteration. The structure of the LFSR is defined by the structure of an irreducible polynomial, and the iterations differ in that the LFSR has different initial values at the beginning of each iteration. The structure of the LFSR, the initial states of the LFSR and the direction of the test determine the three main parameters that define the pseudo-ring test [13]. An example of iterative pseudo-ring testing is presented in **Fig. 2**.

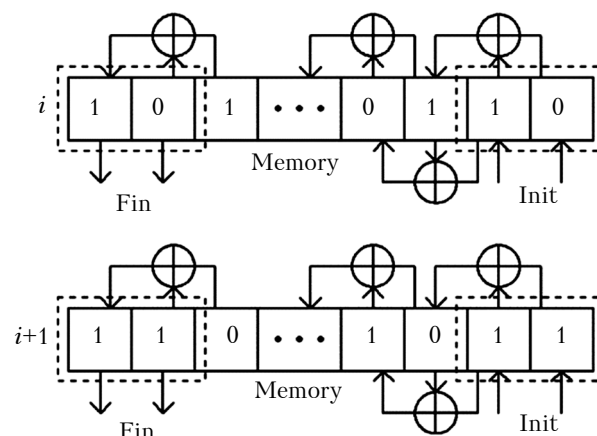


Fig. 2. An example of iterative pseudo-ring testing

In Fig. 2 'i' means the iteration number, 'Init' stands for the initial state of the LFSR, and 'Fin' is the final state of the LFSR. The final state of the LFSR is compared with the expected one [13]. If these two states are different, then a fault has been detected. Also, the final state of the LFSR based on a certain irreducible polynomial will coincide with the initial one if no faults were detected, provided that the number of memory cells is equal to the irreducible polynomial period.

For word-oriented memory tester, the LFSR structure is given by the structure of an irreducible polynomial over extended Galois fields [14]. This study deals with 4-bit memory testing. In this case, we can apply the irreducible polynomial  $g(z)=1+2z+2z^2$  over the extended Galois field  $(2^2)^4$  with the generating polynomial  $p(x)=1+x+x^4$ . The period of the polynomial will be equal to

$$T = (2^n)^m - 1, \quad (1)$$

where  $n$  is the bit width of the memory cells,  $m$  is the number of digits in the LFSR [14].

In our case, the period will be equal to

$$T = (2^4)^2 - 1 = 255.$$

Thus, for 4-bit memory, the value of the memory cells with addresses 0 and 1 should be equal to memory cells with addresses 255 and 256.

Let's consider in detail the principle of single dynamic faults detection by pseudo-ring tests.

### 3. Pseudo-ring tests resolution determining

Pseudo-ring tests resolution is determined practically, i. e., by simulating the pseudo-ring testing in the faulty memory, since it is rather difficult to analytically determine the resolution. For simulating pseudo-ring testing in the faulty memory, we can apply the algorithm described in detail in [15]. This simulation system can be implemented in Python 3. This programming language is the easiest to learn and has many auxiliary libraries, which greatly simplifies and speeds up the development process of any system.

Let us consider a test with the following parameters:

- the structure of LFSR is determined by the irreducible polynomial  $g(z) = 1+2z+2z^2$  over the extended Galois field  $(22)^4$  with the generating polynomial  $p(x) = 1+x+x^4$ ;

- the initial state of LFSR:

- 0000 0000
- 0000 0001
- 0000 0010
- ...
- 1000 0000

- test direction: ascending addresses.

We shall call this test PS01 (pseudo-ring 01), where 0 is the first iteration, and 1 is all iterations in which there is 1 in the initial state. This test can also be written as PS [ $w0\ w1$ ], where  $w0$  provides writing to all cells of logical 0 (the first iteration of the test), and  $w1$  provides writing to all cells of logical 1 (all remaining iterations of the test). The logical 1 with the displacement in the initial states of the LFSR, passing through all the bits of the LFSR (all test iterations except the first), provides writing to all memory cells of the logical 1, which is well described in the source [9].

When determining the resolution of the PS01 test with respect to dRDF, dDRDF and dIRF, it is important to use the pseudo-ring tester architecture with external loading of the initial state and unloading of the final state of the LFSR.

PS01 test based on the architecture shown in Fig. 3 can be called PS01e (pseudo-ring 01 external). Also, this test can be written as PS[ $w0\ w1$ ]e. This tester architecture provides the condition that each tested memory cell will be read two times. This feature will be important for detecting single dynamic faults. Let us proceed to the consideration of the PS01e resolution definition in relation to these faults.

The example of PS01e executing in memory with dRDF is presented in Fig. 4.

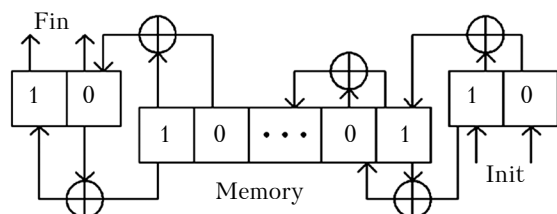


Fig. 3. Pseudo-ring tester architecture for dynamic faults detecting

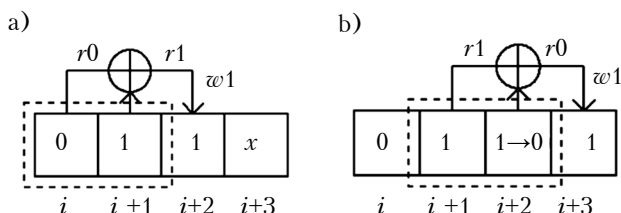


Fig. 4. Example of dRDF detecting by PS01e

Fig. 4, *a* shows an example when, during the testing process, the LFSR is at the memory cells with addresses  $i, i+1$ . At the next step of testing, the LFSR is at the memory cells with addresses  $i+1, i+2$  (Fig. 4, *b*). In this example, a dRDF fault occurs in the cell  $i+2$ . The value 1 should be recorded in this cell. Fig. 4, *b* shows that when reading cell  $i+2$  the contents of this cell is inverted and instead of reading 1, 0 is read. The value written to the cell  $i+3$  will be 1. This change in the cell  $i+2$  also leads to the fact that the final LFSR state does not coincide with the expected one and, as a result, the fault will be detected.

The result of PS01e simulating in memory with dRDF is presented in Fig. 5.

In Fig. 5, *a*, the executed iterations are numbered 0, 1, 2, ... 8; 51.76 means that 51.76% of possible faulty cells with dRDF00 where detected by iteration 0; 76.08 means that 76.08% of all possible faulty cells with dRDF00 where detected by iterations 0 and 1; 93.24 means that 93.24% of all possible faulty cells with dRDF00 where detected by all 9 iterations of the test PS01e.

Fig. 5, *b, c, d* present PS01e fault coverage for dRDF10, dRDF01 and dRDF11 respectively.

Also, Fig. 5 shows that PS01e detects all dRDF01, since in this case the next condition in each memory cell is provided:  $0w1r1$ , that is, the reading 1 after the transition from 0 to 1. The remaining types of dRDF cannot be fully detected by this test. The algorithmic complexity of the PS01e test is  $3 \cdot 9N = 27N$ , where  $N$  is the number of the memory cells. To detect dRDF00, we need to duplicate the operation  $w0$ . To detect dRDF10, we can add operation  $w0$  at the end of the PS01e test. Thus, the PS[ $w0\ w0\ w1\ w0$ ]e or PS0010e test can be applied to detect all dRDF except dRDF11.

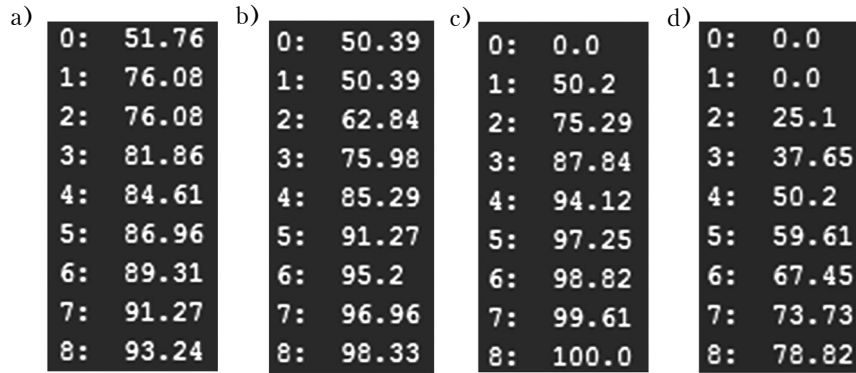


Fig. 5. PS01e resolution with respect to dRDF00 (a), dRDF10 (b), dRDF01 (c) and dRDF11 (d)

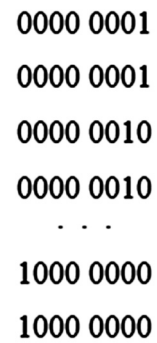


Fig. 6. Initial LFSR states with double operation  $w1$

Algorithmic complexity of this test will be equal to  $3 \cdot 11N = 33N$ . To detect dRDF11, it is necessary to duplicate the operation  $w1$ . The initial LFSR states for  $w1$  will look as is shown in Fig. 6.

In this case, the algorithmic complexity of the test will increase significantly:  $3 \cdot 19N = 57N$ , but all dRDF will be detected. This test could be written as PS[ $w0 \ w0 \ 2w1 \ w0$ ]e or PS001<sub>2</sub>0e.

Let us consider PS01e resolution in relation to other single dynamic faults. The example of PS01e executing in memory with dRDF is presented in Fig. 7.

Fig. 7, a shows an example when, during the testing process, the LFSR is at the memory cells with addresses  $i+1, i+2$ . At the next step of testing, the LFSR is at the memory cells with addresses  $i+2, i+3$  (Fig. 7, b). In this example, a dRDF fault occurs in cell  $i+2$ . The value 1 should be recorded in this cell.

Fig. 7, b shows that during the reading of  $i+2$  cell, the content of this cell is inverted, but the correct state 1 is read. The written value to the  $i+3$  cell will be 0. When the  $i+2$  cell will be read again, the read value will not be 0 and as a result, not the expected value 1, but the value 0 will be written to the  $i+4$  cell. This change will lead to the fact that the final LFSR state does not coincide with the expected one and, as a result, the fault will be detected.

The result of PS01e simulating in memory with dRDF is presented in Fig. 8.

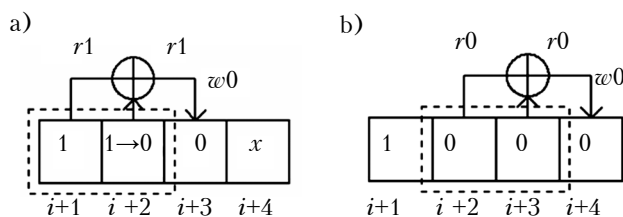


Fig. 7. Example of dRDF detecting by PS01e

In Fig. 8, a, the executed iterations are numbered 0, 1, 2, ... 8; values in the right part mean how many of possible faulty cells with dRDF00 where detected. For example: 89.9 means that 89.9% of all possible faulty cells with dRDF00 where detected by 7 iterations of the PS01e. Fig. 8, b, c, d present PS01e fault coverage for dRDF10, dRDF01 and dRDF11 respectively.

Fig. 8 shows that PS01e detects all dRDF01. We can use the PS[ $w0 \ w0 \ w1 \ w0$ ]e or PS001<sub>2</sub>0e test to detect all dRDF except dRDF11, and we need to use the PS001<sub>2</sub>0e test to detect all dRDF.

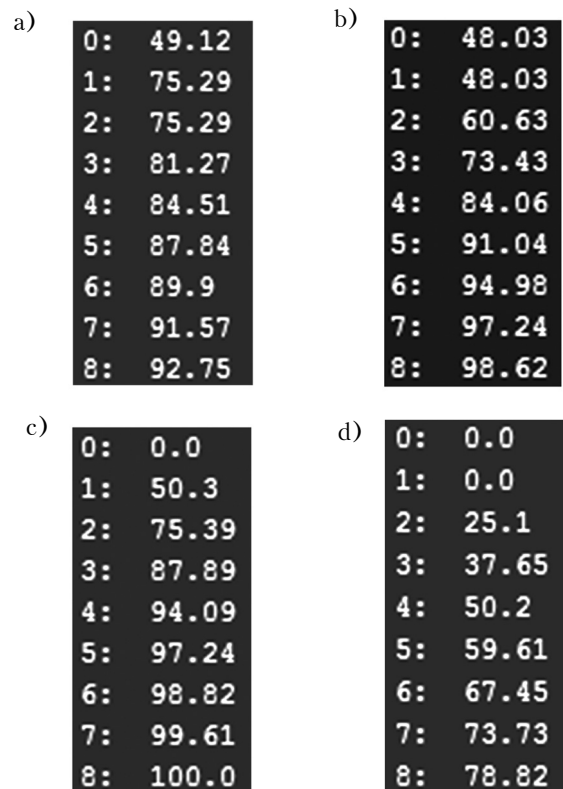


Fig. 8. PS01e resolution with respect to dRDF00 (a), dRDF10 (b), dRDF01 (c) and dRDF11(d)



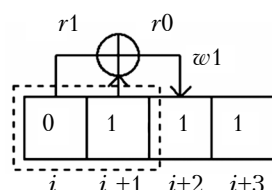


Fig. 9. Example of dIRF detecting by PS01e

a)	b)	c)	d)
0: 49.9	0: 50.2	0: 0.0	0: 0.0
1: 74.71	1: 50.2	1: 50.2	1: 0.0
2: 74.71	2: 62.35	2: 75.29	2: 25.1
3: 81.57	3: 75.69	3: 87.84	3: 37.65
4: 84.41	4: 85.59	4: 94.12	4: 50.2
5: 87.45	5: 91.76	5: 97.25	5: 59.61
6: 89.8	6: 95.69	6: 98.82	6: 67.45
7: 91.27	7: 98.43	7: 99.61	7: 73.73
8: 93.24	8: 99.41	8: 100.0	8: 78.82

Fig. 10. PS01e resolution with respect to dIRF00 (a), dIRF10 (b), dIRF01 (c) and dIRF11(d)

Let us consider PS01e resolution in relation to dIRF. The example of PS01e executing in memory with dIRF is presented in Fig. 9.

Fig. 9 shows an example when, during the testing process, the LFSR is at the memory cells with addresses  $i+1$ ,  $i+2$ . In this example, a dIRF fault occurs in the  $i+2$  cell. The value 1 should be recorded in this cell. During the  $i+2$  cell reading, the contents of this cell remains correct, but the incorrect state 0 is read. The value 1 will be written to the  $i+3$  cell and the final state of the LFSR will not coincide with the expected one, and as a result the fault will be detected.

The result of PS01e simulating in memory with dIRF is presented in Fig. 10.

In Fig. 10, a, the executed iterations are numbered 0, 1, 2, ... 8; values in the right part mean how many of possible faulty cells with dIRF00 where detected. For example: 81.57 means that 81.57% of all possible faulty cells with dIRF00 where detected by 4 iterations of the PS01e. Fig. 10, b, c, d present PS01e fault coverage for dIRF10, dIRF01 and dIRF11 respectively.

Fig. 10 shows that PS01e detects all dIRF01. To detect all dIRF except dIRF11, we can use test PS[w0 w0 w1 w0]e or PS0010e, and to detect all dIRF, we must apply the PS00120e test.

Results of single dynamic faults detection by different tests are presented in the Table.

Test resolution for single dynamic faults

Test	dRDF	dDRDF	dIRF	Algorithmic complexity
PS01e	1/4	1/4	1/4	27N
PS0010e	3/4	3/4	3/4	33N
PS00120e	4/4	4/4	4/4	57N
March U	2/4	0/4	2/4	13N
March LA	2/4	2/4	2/4	22N

The Table presents the resolution and algorithmic complexity of the pseudo-ring tests and March tests for 4-bit memory [11, 12]. For example, '2/4' means that a test fully detects two subtypes of faults from the four possible ones,  $N$  indicates the number of memory cells. According to the results presented in the Table, pseudo-ring tests have higher algorithmic complexity, but at the same time they detect single dynamic faults well.

### Conclusion

According to the research results presented in the paper, it can be argued that the pseudo-ring tests have a high resolution with respect to single dynamic faults in the word-oriented memory. The PS0010e test presented in this paper detects 75% of all dynamic single faults with an algorithmic complexity of  $33N$ , where  $N$  is the number of all memory cells. By comparison, the March LA test detects only 50% of all dynamic single faults with algorithmic complexity  $22N$ . Thus, the algorithmic complexity of the pseudo-ring tests is higher than that of the March tests, but the detecting ability of the pseudo-ring tests is high, and their algorithmic complexity remains linear in comparison with classical testing methods.

### REFERENCES

1. Borri S., Hage-Hassan M., Girard P., Pravossoudovitch S., Virazel A. Defect-oriented dynamic fault models for embedded-SRAMs. *The Eighth IEEE European Test Workshop*, 2003, pp. 23–28. <https://doi.org/10.1109/ETW.2003.1231664>
2. Van de Goor A. J., Al-Ars Z. Functional memory faults: a formal notation and a taxonomy. *18th IEEE VLSI Test Symposium*, Montreal, Que, 2000, pp. 281–289. <https://doi.org/10.1109/VTEST.2000.843856>
3. Dilillo L., Girard P., Pravossoudovitch S. et al. Dynamic read destructive fault in embedded-SRAMs: analysis and march test solution. *ETS 2004*, pp. 140–145. <https://doi.org/10.1109/ETSYM.2004.1347645>
4. Dilillo L., Girard P., Pravossoudovitch S. et al. Efficient test of dynamic read destructive faults in SRAM memories. *6th IEEE Latin American Test Workshop*, 2005, pp. 40–45.

5. Yarmolik S., Zankovici A., Ivaniuk A. *Marshevye Testy Dlja Samotestirovanja OZU* [Marching Tests for RAM Self-Testing]. Minsk: Izdatelskiy tsentr BGU, 2009, 270 p. (Rus)
6. Kusuma L. Performance analysis of bist algorithm for RAMs. *International Journal for Technological Research in Engineering*, 2015, vol. 2, iss. 7, pp. 674–678.
7. Om. S. Al-Mushayt. Concept of pseudo-ring self-test of the RAM. *Science International*, 2014, vol. 26(2), pp. 755–758.
8. Bodean G. C. Compact testing of RAM: Schemes, tools and results. *Automation, Quality and Testing, Robotics*, Cluj-Napoca, Romania, 2008, pp. 227–232.
9. Grițcov S. Algorithmic complexity of pseudo-ring testing for stuck-at faults. *The 5<sup>th</sup> International Conference «Telecommunications, Electronics and Informatics»*, UTM, Chisinau, 2015, pp. 75–76.
10. Grițcov S. II-testirovanie s primeneniem LFSR na osnove privodimykh polinomov, *The 5<sup>th</sup> International Conference «Telecommunications, Electronics and Informatics»*, UTM, Chisinau, 2015, pp. 130–131.
11. Hamdioui S., Al-Ars Z., van de Goor A. J. et al. Dynamic faults in random-access-memories: concept, fault models and tests. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 2003, vol. 19, iss. 2, pp. 195–205. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1022802010738>
12. Hamdioui S., Al-Ars Z., van de Goor A. J. Testing static and dynamic faults in random access memories. *Proceedings of the 20<sup>th</sup> IEEE VLSI Test Symposium*. 2002, pp. 395–400. – <https://doi.org/10.1109/VTS.2002.1011170>
13. Grițcov S., Sorochin Gh., Șestacova T. Pseudo-ring testing of the FPGA memory using software Nios processor. *The 6<sup>th</sup> International Conference «Telecommunications, Electronics and Informatics»*, UTM, Chisinau, 2018, pp. 328–331.
14. Bodean Gh. *Coduri nonbinare corectoare de erori* [Non-binary codes for error correction]. Chisinau, Editura «Tehnica-UTM», 2010, 550 p. (Md)
15. Grițcov S., Lazar D., Sorochin Gh. [Development of a simulation system for determining-tests resolution]. *The 5<sup>th</sup> International Conference «Telecommunications, Electronics and Informatics»*, UTM, Chisinau, 2015, pp. 132–133. (Rus)

Received 16.11 2018

DOI: 10.15222/TKEA2018.5-6.03  
УДК 004.33

С. С. ГРИЦКОВ, Г. Ф. СОРОКІН,  
Т. В. ШЕСТАКОВА

Молдова, м. Кишинів,  
Технічний Університет Молдови  
E-mail: gritscov@gmail.com

## ЗДАТНІСТЬ ПСЕВДОКІЛЬЦЕВИХ ТЕСТІВ ВІЯВЛЯТИ ДИНАМІЧНІ ОДИНОЧНІ НЕСПРАВНОСТІ У СЛОВООРІЄНТОВАНИЙ ПАМ'ЯТІ

У даній роботі представлені одиночні динамічні несправності цифрової пам'яті і методи їхнього виявлення. Детально розглянуто такі динамічні несправності, як динамічне руйнівальне читання (*Dynamic Read Destructive Fault – dRDF*), динамічне уявне руйнівне читання (*dynamic Deceptive Read Destructive Fault – dDRDF*) і динамічне некоректне читання (*dynamic Incorrect Read Fault – dIRF*).

Існують різні методики виявлення даних несправностей. Найбільш популярною методикою є маршові тести, оскільки таким тестам властива лінійна алгоритмічна складність, яка визначає число операцій, що проводяться над кожною коміркою пам'яті в процесі тестування. Дана особливість визначає мінімальний час виконання тесту.

Альтернативою маршовим тестам є псевдокільцеві тести. Їхньою перевагою над іншими існуючими методами тестування є низька апаратна складність. Псевдокільцеві тести мають лінійно алгоритмічну складність. Вони непогано досліджені відносно класичної однобітної пам'яті, але що стосується словоорієнтованої пам'яті, тут дослідження псевдокільцевого тестування практично відсутні.

У даній роботі розглядаються псевдокільцеві тести по відношенню до одиночних динамічних несправностей на прикладі чотирьохбітної пам'яті. Представлена загальна ідея ітеративного псевдокільцевого тестування. Детально розглянуто принцип виявлення dRDF, dDRDF і dIRF, а також представлено здатність псевдокільцевих тестів виявляти дані несправності.

Показано, що псевдокільцеві тести мають не гіршу здатність виявляти вказані несправності, ніж маршові тести. За результатами роботи видно, що псевдокільцеві тести з алгоритмічною складністю  $(30-60)N$ , де  $N$  – кількість всіх осередків пам'яті, дозволяють покрити від 75 до 100% всіх одиночних динамічних несправностей, що вказує на можливість їхнього використання як альтернативи існуючим тестам.

Ключові слова: динамічні одиночні несправності, псевдокільцеве тестування, ітеративність.

С. С. ГРИЦКОВ, Г. Ф. СОРОКИН, Т. В. ШЕСТАКОВА

Молдова, г. Кишинев, Технический Университет Молдовы

E-mail: gritscov@gmail.com

## СПОСОБНОСТЬ ПСЕВДОКОЛЬЦЕВЫХ ТЕСТОВ ОБНАРУЖИВАТЬ ДИНАМИЧЕСКИЕ ОДИНОЧНЫЕ НЕИСПРАВНОСТИ В СЛОВООРИЕНТИРОВАННОЙ ПАМЯТИ

*В данной работе представлены одиночные динамические неисправности цифровой памяти и методы их обнаружения. Детально рассмотрены такие динамические неисправности, как динамическое разрушающее чтение (dynamic Read Destructive Fault – dRDF), динамическое мнимое разрушающее чтение (dynamic Deceptive Read Destructive Fault – dDRDF) и динамическое некорректное чтение (dynamic Incorrect Read Fault – dIRF).*

*Существуют различные методики обнаружения данных неисправностей. Наиболее популярной методикой являются маршевые тесты, поскольку они обладают линейной алгоритмической сложностью, определяющей число операций, проводимых над каждой ячейкой памяти в процессе тестирования. Данная особенность определяет минимальное время выполнения теста.*

*Альтернативой маршевым тестам являются псевдокольцевые тесты. Их преимуществом перед другими существующими методами тестирования является низкая аппаратная сложность. Псевдокольцевые тесты неплохо изучены по отношению к классической однобитной памяти, однако их исследования касательно словоориентированной памяти практически отсутствуют.*

*В данной работе рассматриваются псевдокольцевые тесты по отношению к одиночным динамическим неисправностям на примере четырехбитной памяти. Представлена общая идея итеративного псевдокольцевого тестирования. Подробно рассмотрен принцип обнаружения dRDF, dDRDF и dIRF и представлена способность псевдокольцевых тестов обнаруживать данные неисправности.*

*Показано, что псевдокольцевые тесты обладают не худшей обнаруживающей способностью, чем маршевые тесты. По результатам работы видно, что псевдокольцевые тесты с алгоритмической сложностью  $(30-60)N$ , где  $N$  — количество всех ячеек памяти, позволяют покрыть от 75 до 100% всех одиночных динамических неисправностей, что указывает на возможность их использования как альтернативы существующим тестам.*

*Ключевые слова: динамические одиночные неисправности, псевдокольцевое тестирование, итеративность.*

### Cite the article as:

Gritcov S. S., Sorokin G. F., Shestacova T. V. Pseudo-ring tests resolution for dynamic single faults in word-oriented memory. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature, 2018, no. 5–6, pp. 3–9. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.03>

A. F. BELYANIN<sup>1</sup>, V. V. BORISOV<sup>2</sup>, V. V. POPOV<sup>3</sup>

Russia, Moscow, <sup>1</sup>Central Research Technological Institute "Technomash",

<sup>2</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University,

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University

E-mail: belyanin@cniitlm.ru

## X-RAY RADIATION DURING PULSED LASER TREATMENT OF OPAL MATRICES

*The paper presents the structure and preparation conditions of opal matrices (ordered 3D-lattice packing of X-ray amorphous SiO<sub>2</sub> spheres with a diameter of ≈250 nm), as well as experimental data on nonlinear optical effects in opal matrices with pulsed laser excitation at wavelengths: 1040 nm, 510 nm in conjunction with 578 nm, and 366 nm. The authors investigate the energy spectra of X-ray radiation induced in the samples by laser irradiation.*

**Keywords:** opal matrix, laser radiation, X-ray radiation, energy spectrum.

Materials with photonic band gaps (photonic crystals), i. e. materials with a periodic (of the order of the light wavelength) change in the dielectric constant, are currently the subject of extensive theoretical and experimental research. Photonic crystals based on opal matrices (**OM**) are of interest for practical application. OMs are made up of well ordered closely packed silica nanospheres (amorphous SiO<sub>2</sub>) of the same diameter [1, 2]. The packing of spheres contains a 3D system of inter-connecting octahedral and tetrahedral inter-sphere voids, occupying approximately 26% of the matrix volume. Depending on the formation conditions, the diameter of the spheres varies within the preassigned limits from 200 to 700 nm [2–5].

Having the formation parameters fixed, the variation in diameter does not exceed 1.5%. OMs and OM-based nanocomposites (OMs with inter-sphere voids filled with various substances) are used to create devices operating in the optical, microwave and THz ranges [3, 6]. OMs may serve as functional environments both for the generation of X-rays or acoustic waves, and for signal conversion in controlling devices [7, 8]. One may hope that the emergence of new designs using such materials will allow creating electronic devices with improved performance characteristics.

The greatest interest is aroused by the application of OMs in an unexplored area of the X-ray generation by exposing the substance to laser radiation [7, 9]. Solving the problem of increasing the technical and technological characteristics of X-ray sources by creating fundamentally new designs can lead to the development of subminiature

X-ray sources. Coupling laser radiation into optical fibers is widely used to solve a large number of practical problems, for example, it is used in medicine for endoscopic studies of internal organs, pyrometry, spectroscopy, etc. Placing the OM at the output of the optical fiber with laser radiation makes it possible to deliver X-ray radiation directly to the irradiated object.

When a parallel fiber is added to transmit data to a Raman spectrometer, it becomes possible to monitor the effectiveness of local X-ray influence. When solving a large number of practical problems, such as transporting radiation to an object of impact in medicine, etc., a high-power laser can be coupled into the optical fiber. In [7], X-ray radiation was induced when a single pulse of a ruby laser was applied to an OM (wavelength 694.3 nm, pulse duration 20 ns, maximum pulse energy 0.3 J, power density at the focus 0.25–10 GW/cm<sup>2</sup>). X-ray radiation was registered using an X-ray film designed for a photon energy of 10 keV. This method, though, allows determining the energy characteristics of the radiation with some level of approximation.

In this study, an X-ray spectrometer is used to study the energy spectra of X-ray radiation induced by exposure of opal matrices to pulsed laser radiation with different wavelengths: 1040 nm (IR spectral range), 510 and 578 nm (combined modes), and 366 nm (UV range).

### Experimental samples

Opal matrices were obtained at a temperature of 310–350 K from an emulsion prepared by mixing 1 part of a 25% aqueous solution of ammonium hydroxide (NH<sub>4</sub>OH), 50 parts of ethanol

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant N 18-29-02076 MK)



( $C_2H_5OH$ ) and 1.6 parts of tetraether orthosilicic acid ( $Si(OC_2H_5)_4$ ) [10]. The regularity of the packing of  $SiO_2$  spherical particles was achieved due to self-organization, and the diameter of the spheres depended on the conditions of their formation. The chemicals used in the preparation of OM were removed from the samples by heat treatment in vacuum (775–975 K,  $\approx 1$  Pa). Then the OM were hydrothermally hardened at increased temperature and pressure. The hardening made it possible to mechanically process the OM, and thus obtain samples of the required dimensions with specified physical properties.

The test samples were made to be 1.5–5.0 mm thick plates obtained by dry mechanical treatment from bulk OM, either not hardened or hardened by annealing at up to 1475 K in air. The arithmetic mean deviation of the plate surface profile, measured with an Alpha-Step 200 profilograph-profilometer, was  $R_a = 1.2 \mu m$ . The experiments were performed on both unfilled OM and OM with the inter-spherical voids filled with deionized water (OM:H<sub>2</sub>O) to reduce the thermal effect of laser radiation. With the same purpose, a number of experiments were carried out with samples immersed in liquid nitrogen (OM:L<sub>N2</sub>).

### X-ray research technique

The X-radiation occurring from laser irradiation of the OM was recorded using a photographic film placed in an opaque cassette and a Canberra UniSpec 503 gamma spectrometer operating at room temperature without cooling. The data obtained from the spectrometer were calibrated by the spectra of four test X-ray sources ( $^{55}Fe$ ,  $^{133}Ba$ ,  $^{152}Eu$  and  $^{241}Am$  isotopes).

When the radiation was registered by a film as it is shown in **Fig. 1**, the laser radiation passed through the OM and its direction coincided with the direction of the induced X-radiation ( $\varphi = 0^\circ$ ). The parameters of the laser radiation were chosen so that the material of the cassette (thick black paper covered with Scotch transparent adhesive film) that is not transparent to visible light would not be

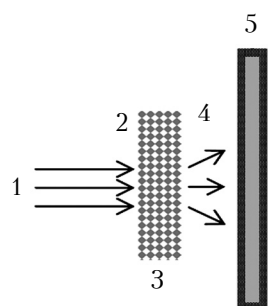


Fig. 1. Schematic illustration of registering X-radiation by photo film at  $\varphi = 0^\circ$ :

1 – laser radiation; 2 – focal plane of laser radiation; 3 – OM (10×10×1.5 mm) with H<sub>2</sub>O; 4 – X-radiation; 5 – photo film cassette

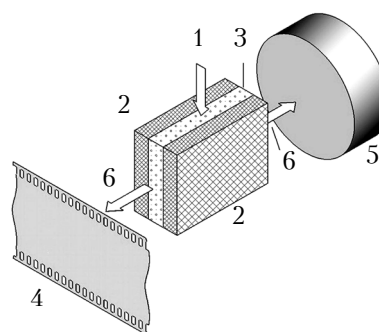


Fig. 2. Schematic illustration of registering X-ray radiation by gamma-spectrometer and photo film at  $\varphi = 90^\circ$ :

1 – laser radiation; 2 –  $LiNbO_3$  plates (10×10×1 mm); 3 – OM (10×10×(3–5) mm); 4 – photo film cassette; 5 – spectrometer sensor window; 6 – X-radiation

destroyed. The photosensitivity of the photo film (type 42) was 1000–1400 units (state standard ГОСТ 10691.5), sensitization limit 700–730 nm.

In some cases, during registration of micro X-ray radiation, laser radiation was applied to the OM placed between two plates of single crystal lithium niobate ( $LiNbO_3$ ), a piezoelectric material [11], and X-rays were recorded at an angle of  $90^\circ$  to the direction of laser radiation (**Fig. 2**). This was done in order to avoid damaging the spectrometer sensor window made of beryllium foil.

The parameters of the used laser radiation sources are given in **Table 1**, where  $\lambda$  is the wavelength,  $f$  is the frequency,  $\tau$  is the pulse duration,  $P$  is the average pulse power,  $D$  is the diameter of the laser beam at the focus. For systems with a galvanometric scanner of the laser beam (IR<sub>1040</sub>, UV<sub>355</sub>), the following areas were processed during one OM laser irradiation session: a 5×5 mm square with a 20 lines/mm linear shading on the OM focal plane when registering at an angle of  $0^\circ$ , and a 5 mm long line on the verge of the OM parallel to the OM focal plane when registering at an angle of  $90^\circ$ .

Table 1

The parameters of the used laser radiation sources

Laser radiation source, manufacturer (designation)	$\lambda$ , nm	$f$ , kHz	$\tau$ , ns	$P$ , W	$D$ , $\mu m$
YLP-1-20, IRE-POLUS (IR <sub>1040</sub> )	1040	50	10	10	50
DPSS UV Pro, "Sharplase" (UV <sub>355</sub> )	355	40	20	3	37
CVL, LPI RAS (C <sub>VL</sub> )	510, 578	10	15	3	20

### Study of the structure and composition of opal matrices

Tests were performed on opal matrices with a volume of up to  $1 \text{ cm}^3$ , a diameter of  $\text{SiO}_2$  spheres  $d \approx 250 \text{ nm}$  ( $\Delta d \approx 2\%$ ) and a volume of monodomain regions (areas of well ordered sphere packing) of at least  $0.1 \text{ mm}^3$ . The following pieces of equipment were used: a Carl Zeiss Leo 1430 VP scanning electron microscope (SEM); a JEM 200C transmission electron microscope (TEM); an ARL X'tra (Thermo Fisher Scientific) X-ray diffractometer, and a LabRAM HR800 (HORIBA Jobin-Yvon) laser Raman spectrometer (632.8 nm line of He–Ne laser).

It was established that in the OM samples, the monodomain regions are disordered relative to each other (Fig. 3, *a*). Under the conditions assumed in this study, a three-layer (cubic) packing of  $\text{SiO}_2$  spheres was formed [10]. The hardening of the OM was caused by the transfer of  $\text{SiO}_2$  to the region of contact between the spheres with the formation of  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$  bonds. Transmission electron microscopy shows the presence of contact pads with a diameter of  $k = (0.1-0.3)d$  while the  $\text{SiO}_2$  particles maintain the regular spherical shape and are not deformed at their contact points (Fig. 3, *c*). The high bond strength of the contacting  $\text{SiO}_2$  spheres can be seen on chipped edges of the OM, where the areas of their separation are visible (Fig. 3, *b*).

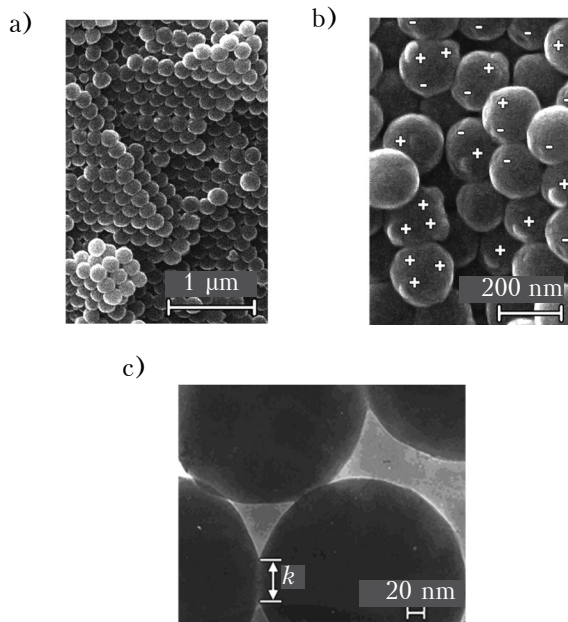


Fig. 3. SEM images of the growth surface (*a*) and chipped edge (*b*) of the OM, and a TEM image of the contact area of  $\text{SiO}_2$  spheres (*c*) (in *b*, pluses represent convex areas, and minuses stand for concave areas in the points where the spheres are separated between the contact pads)

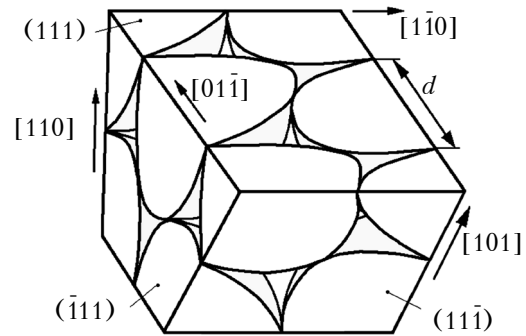


Fig. 4. Bulk fragment of the OM (cut along  $\{111\}$  planes)

Fig. 4 shows the bulk model of the OM (lattice packing of  $\text{SiO}_2$  nanospheres) with the spatial ordered arrangement of inter-sphere voids. The triangles with concave sides on the cutout planes of the bulk fragment of the OM are the cross-sections of the channels, connecting the tetrahedral and octahedral inter-sphere voids. It should be noted that in hardened OMs, the real dimensions of the voids are smaller than the theoretical ones.

X-ray diffractometry revealed that the OMs, annealed in air at 1475 K, contain a phase of  $\text{SiO}_2$  cristobalite (space group  $P4_12_12$ ) with approximately 20-nm crystallites (areas of coherent X-rays scattering). In samples annealed at temperatures below 1475 K, it is impossible to register this phase using X-ray diffraction – the small crys-

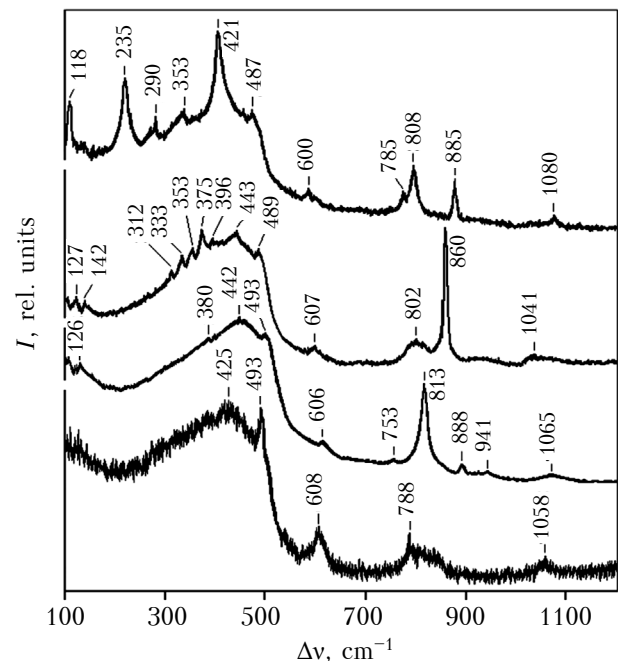


Fig. 5. Raman spectra of the OM, annealed at different temperatures and time periods: 1 – 1175 K, 4 h; 2 – 1325 K, 24 h; 3 – 1375 K, 4 h; 4 – 1475 K, 8 h

tallite size ( $<1$  nm) does not allow identifying them due to the size broadening of the diffraction maxima, according to the Debye–Sherrer equation. In this case, the crystalline phase of  $\text{SiO}_2$  was identified by Raman spectroscopy of Raman scattering. Raman spectra of amorphous  $\text{SiO}_2$  are characterized by bands with a frequency shift  $\Delta\nu$  of Raman scattering near 420, 490, 600, 800 and  $1060\text{ cm}^{-1}$  (Fig. 5, curve 1). At temperatures above 1175 K, amorphous silica begins recrystallizing into  $\text{SiO}_2$ -cristobalite (space group  $\text{P4}_12_12$ ); at 1375 K, the crystalline phase of  $\text{SiO}_2$ -quartz (space group  $\text{P3}_12_1$ ) is formed (band at  $\Delta\nu = 860\text{ cm}^{-1}$ ), which at 1475 K is transformed into  $\text{SiO}_2$ -cristobalite (Fig. 5)

### Investigation of induced pulsed X-radiation

In some cases, during measurements using the spectrometer, the speed of data acquisition in the X-ray energy range up to 2 keV depended on both environmental conditions and the power of the computing equipment used. Therefore, in order to obtain reliable results from the absolute numerical data of the X-ray spectrum (abs.), the background values of the spectrum registered when the laser source was blocked, were subtracted, thus obtaining a corrected spectrum (rel.).

The experimental conditions and the parameters of the obtained X-ray radiation are summarized in Table 2, where  $V$  is the scanning speed (for the systems without a  $\text{C}_{\text{VL}}$  galvanometric scanner, the laser beam is stationary);  $\varphi$  is the angle of X-ray registration;  $h_1$  is the distance from the OM to the photo film cassette;  $h_2$  is the distance from the OM to the spectrometer window;  $\text{OM}_{\text{an}}$  is the OM strengthened by annealing;  $S_{\text{T}}$  is the type of spectrum;  $t$  is the duration of one laser radiation session;  $E_{\text{XR}}$  is the energy of X-ray quanta corresponding to the maximum intensity peak in the spectrum;  $\lambda_{\text{XR}}$  is the X-ray wavelength corresponding to  $E_{\text{XR}}$ .

As can be seen from Fig. 6 and 7, when OMs are exposed to laser radiation with a wavelength of  $\lambda = 1040$  nm, the induced X-ray radiation is scattered more strongly than at  $\lambda = 355$  nm. Moreover, when exposed to laser radiation from the UV region, compared to the IR region, intense luminescence in the visible light range is observed in the hardened OM. It is possible that the high sensitivity of the used photo film causes halos to appear in the photographs (see Fig. 7), which is due to the thermal effect of laser radiation on the sample through the protective material of the cassette. The photographs

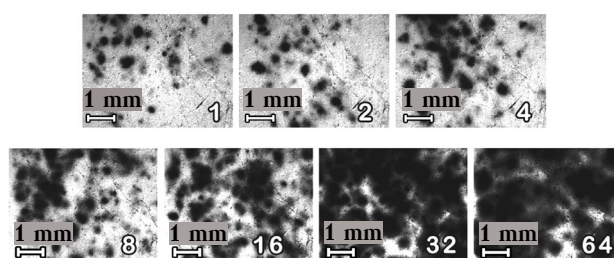


Fig. 6. Images obtained when X-ray radiation induced by the  $\text{UV}_{355}$  source was applied to the film at  $\varphi = 0^\circ$ ,  $V = 1\text{ m/s}$  (the numbers on the images are the number of repetitions of the laser radiation session)

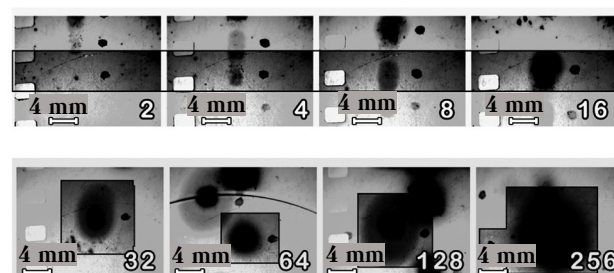


Fig. 7. Images obtained when X-ray radiation induced by an  $\text{IR}_{1040}$  source was applied to a film at  $\varphi = 0^\circ$ ,  $V = 0.8\text{ m/s}$  (the numbers on the images are the number of repetitions of a laser radiation session; the area of X-ray radiation exposure is framed, the point of impact is marked with a dot)

Table 2

Experimental conditions and parameters of the obtained X-ray radiation

Source	$V$ , $\text{m/s}$	$\varphi$ , $^\circ$	$h_1$ , $\text{mm}$	$h_2$ , $\text{mm}$	Sample		$S_{\text{T}}$	$t$ , s	$E_{\text{XR}}$ , keV	$\lambda_{\text{XR}}$ , nm
					composition	thickness, mm				
$\text{IR}_{1040}$	0,8	90	2,5	2,5	$\text{OM:H}_2\text{O}$	1,5	abs.	60	0,08	15,2
$\text{UV}_{355}$	1,0								1,04	1,2
$\text{C}_{\text{VL}}$	0	90	70	80	$\text{OM:L}_{\text{N}_2}$	5,0	rel.	220	1,04	1,2
		0			$\text{OM}_{\text{an}}:\text{H}_2\text{O}$	1,5		698	2,47	0,5

obtained using the  $UV_{355}$  and  $C_{VL}$  laser sources, unlike the  $IR_{1040}$ , show a domain structure of the OM (see Fig. 6 and 7) [7, 8].

The obtained data given in Table 2 and Fig. 8, indicate that the radiation under study is a low-intensity, soft X-ray radiation and its wavelength range intersects with the vacuum UV radiation, which is well absorbed by air. By its characteristics, it is similar to the radiation produced by triboluminescence of adhesive Scotch films at the moments when they are detached from smooth surfaces [12]. The X-ray spectrum induced by laser radiation with  $\lambda = 355$  nm has an additional, shorter-wavelength peak  $\lambda_{XR} = 1.2$  nm, compared to  $\lambda_{XR} = 15.2$  nm on the spectrum obtained at  $\lambda = 1040$  nm (see table 2). An even shorter wavelength peak ( $\lambda_{XR} = 0.5$  nm) is observed when using an  $C_{VL}$  source with combined modes  $\lambda = 510$  nm and  $\lambda = 578$  nm (see Table 2 and Fig. 8).

Fig. 9 shows a photograph of a film after exposure to X-ray radiation induced by the  $C_{VL}$  source.

The test results for the study of dried and non-thermally hardened OMs at the wavelength of laser radiation  $\lambda = 355$  nm with the parameters specified in tables 1 and 2 for the  $UV_{355}$  source, also showed the presence of X-rays. However, in contrast to  $OM_{an}:H_2O$  (strengthened OMs with voids filled with  $H_2O$ ), in these samples some defects characteristic of laser ablation occurred during the course of the experiment.

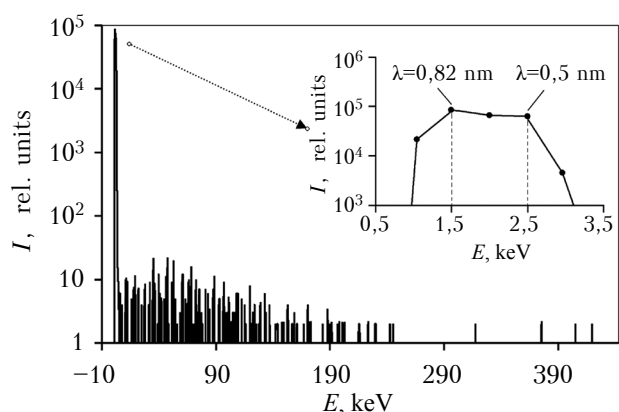


Fig. 8. Relative X-ray spectrum induced by the  $C_{VL}$  source in the OM under the following conditions:  $OM_{an}:H_2O$  thickness 1.5 mm,  $\varphi = 0^\circ$ ,  $h_2 = 80$  mm,  $E_{XR} = 2.5$  keV,  $t = 698$  s,  $\lambda_{XR} = 0.5$  nm

(insert shows the maximum intensity spectrum peak)

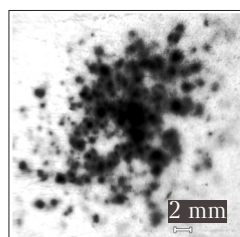


Fig. 9. Image obtained by exposing the photo film to X-ray radiation with the spectrum shown in Fig. 8 ( $h_1 = 70$  mm,  $t = 2$  s)

## Conclusion

Thus, the studies of opal matrices indicate that the parameters of induced X-ray radiation depend on the production conditions and the structure of the OMs (high-temperature annealing, filling of voids, sample thickness), as well as the experimental conditions (obtaining of X-rays at an angle of  $0^\circ$  or  $90^\circ$ , immersion of the sample in liquid nitrogen). One of the necessary conditions for obtaining high-quality measurement results, and for the subsequent creation of devices using lattice packing of  $SiO_2$  nanospheres, is the perfection of the three-dimensional packing of nanospheres.

The obtained spectral data allow us to conclude that the radiation induced by laser irradiation at a wavelength of 1040 nm (IR), 510 nm together with 578 nm, 366 nm (UV), is low-intensity, soft X-ray radiation with a photon energy of 0.08–2.47 keV and with a wavelength of 15.2–0.5 nm. There is a reason to believe that the proper choice of the structural parameters of opal matrices (sizes of  $SiO_2$  spherical particles, inter-sphere contact pads and monodomain regions) and characteristics of laser radiation (wavelength, pulse duration and frequency) will allow increasing the intensity and energy of X-ray quanta, which would make it possible to use the investigated effect in industry and medicine.

## REFERENCES

1. Armstrong E., O'Dwyer C. Artificial opal photonic crystals and inverse opal structures – fundamentals and applications from optics to energy storage. *Journal of materials chemistry C*, 2015, vol. 3, no. 24, pp. 6109–6143, <https://doi.org/10.1039/c5tc01083g>
2. Samoylovich M. I., Belyanin A. F., Bagdasaryan A. S., Bovtun V. Structure and dielectric properties of nanocomposites: opal matrix – titanium oxide and rare-earth titanates. *Fine Chemical Technologies*, 2016, vol. 11, no. 2, pp. 66–73. URL: [https://finechemtech.mirea.ru/upload/medialibrary/c02/09\\_Samoylovich\\_2016\\_No-2.pdf](https://finechemtech.mirea.ru/upload/medialibrary/c02/09_Samoylovich_2016_No-2.pdf)
3. Tuyen L. D., Wu C. Y., Anh T. K. et al. Fabrication and optical characterization of  $SiO_2$  opal and SU-8 inverse opal photonic crystals. *Journal of Experimental Nanoscience*, 2012, vol. 7, no. 2, pp. 198–204, <https://doi.org/10.1080/17458080.2010.515249>
4. Miguez H., Blanco A., Lopez C. et al. Face centered cubic photonic bandgap materials based on opal-semiconductor composites. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, vol. 17, no. 11, pp. 1975–1981, <https://doi.org/10.1109/50.802983>
5. Nishijima Y., Ueno K., Juodkazis S. et al. Inverse silica opal photonic crystals for optical sensing applications. *Optics Express*, 2007, vol. 15, no. 20, pp. 12979–12988, <https://doi.org/10.1364/OE.15.012979>
6. Sarychev A. K., Shalaev V. M. *Electrodynamics of Metamaterials*. World Scientific and Imperial College Press, 2007, 200 p., <http://dx.doi.org/10.1142/4366>
7. Tcherniega N. V., Samoylovich M. I., Belyanin A. F. et al. Generation of electromagnetic and acoustic emissions in nanostructures systems. *Nano- and Microsystems Technology*, 2011, no. 4, pp. 21–31. (Rus)



8. Chernega N.V. et al. *The Method of Generating Pulsed X-Ray Radiation*. Pat. 2469516 RU. 10.12.2012, bul. no. 34. (Rus)

9. Vikhlyayev D.A., Gavrilov D.S., Eliseev M.V. et al. Soft X-ray spectrometer based on spherical grazing mirrors for plasma investigation on SOKOL-P laser facility. *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion*, 2010, no. 2, pp. 57–63. URL: [http://vant.iterru.ru/vant\\_2010\\_2/7.pdf](http://vant.iterru.ru/vant_2010_2/7.pdf) (Rus)

10. Samoylovich M. I., Kleshcheva S.M., Belyanin A. F. et al. 3D-nanocomposites based on ordered packing of silica

nanospheres. *Nano- and Microsystems Technology*, 2004, no. 6, pp. 3–7. (Rus)

11. Chernega N.V. et al. *Device for Generating Directional Pulsed X-Ray Radiation*. Pat. 2480159 RU. 27.04.2013, bul. no. 12. (Rus)

12. Camara C. G., Escobar J. V., Hird J. R., Putterman S. J. Sticky tape generates X rays. *Nature* 455, 2008, pp. 1089–1092. <http://dx.doi.org/10.1038/news.2008.1185>

Received: 08.10 2018

DOI: 10.15222/TKEA2018.5-6.10  
УДК 537.9

А. Ф. БЕЛЯНИН<sup>1</sup>, В. В. БОРИСОВ<sup>2</sup>,  
В. В. ПОПОВ<sup>3</sup>

Росія, м. Москва, <sup>1</sup>ЦНДТІ «Техномаш»,

<sup>2</sup>НДІ ядерної фізики ім. Д. В. Скобельцина,

<sup>3</sup>Московський державний університет ім. М. В. Ломоносова

E-mail: belyanin@cnitit.ru

## РЕНТГЕНІВСЬКЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЩО ВИКЛИКАНЕ ІМПУЛЬСНОЮ ЛАЗЕРНОЮ ДІЄЮ НА ОПАЛОВІ МАТРИЦІ

В даний час матеріали з фотонними забороненими зонами (фотонні кристали), тобто матеріали з періодичною (близько довжини хвилі світла) зміною діелектричної проникності, є об'єктом активних теоретичних та експериментальних досліджень. Для практичного застосування становлять інтерес фотонні кристали на основі опалових матриць (ОМ), які представляють собою щільну 3D-упаковку однакових за діаметром нанокул аморфного  $\text{SiO}_2$ . Найбільший інтерес викликає застосування ОМ в малодослідженій області — генерації рентгенівського випромінювання під час лазерного впливу на речовину.

У даній роботі представлено результати вимірювання за допомогою рентгенівського спектрометра енергетичних спектрів рентгенівського випромінювання, індукованого впливом на ОМ імпульсного лазерного випромінювання з різною довжиною хвилі  $\lambda$ : 1040 нм (ІЧ-область спектра), 510 та 578 нм (суміщенні моди), 366 нм (УФ-область).

ОМ синтезували з розчину гідроксиду амонію ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), етанолу ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) та тетраефіра ортокремнієвої кислоти ( $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ). Упаковка кул  $\text{SiO}_2$  містила 3D-систему сполучених октаедричних і тетраедричних міжкульових пустот, які займають приблизно 26% загального об'єму. В експериментах використовували зразки ОМ в формі пластин товщиною 1–5 мм, які виготовляли за допомогою сухої механічної обробки з об'ємних ОМ, не зміцнених та зміцнених відпадом за температури 1475 K на повітрі.

Рентгенівське випромінювання, що виникає під дією лазера на ОМ, реєстрували фотоплівкою і гамма-спектрометром. Реєстрація проводилась двома способами. В першому випадку лазерне випромінювання проходило через ОМ (зйомка на просвіт) і його напрям співпадав з напрямом індукованого рентгенівського випромінювання ( $\varphi = 0^\circ$ ). У другому рентгенівське випромінювання проходило перпендикулярно лазерному ( $\varphi = 90^\circ$ ), а ОМ розміщували між пластинами з монокристалічного  $\text{LiNbO}_3$ . У ряді експериментів для зменшення теплового впливу на ОМ лазерного випромінювання міжкульові пустоти заповнювали водою або занурювали зразки у рідкий азот.

За результатами спектральних досліджень було встановлено, що індуковане рентгенівське випромінювання є малоінтенсивним м'яким рентгенівським випромінюванням з енергією квантів 0,08–2,47 кеВ і довжиною хвилі  $\lambda_{\text{PI}} = 15,2–0,5$  нм. Спектр рентгенівського випромінювання за  $\lambda = 355$  нм показав наявність додаткового, більш короткохвильового піка  $\lambda_{\text{PI}} = 1,2$  нм в порівнянні з  $\lambda_{\text{PI}} = 15,2$  нм, отриманим за  $\lambda = 1040$  нм. Ще більш короткохвильовий пік  $\lambda_{\text{PI}} = 0,5$  нм спостерігався за використання лазерного джерела, що працює з суміщеними випромінюваннями з  $\lambda = 510$  нм і  $\lambda = 578$  нм. Вплив на ОМ лазерного випромінювання з  $\lambda = 1040$  нм призводить до сильнішого розсіювання індукованого рентгенівського випромінювання порівняно з  $\lambda = 355$  нм. Вплив на ОМ лазерного випромінювання УФ-області викликав інтенсивну люмінесценцію ОМ в діапазоні видимого світла.

Показано, що на параметри рентгенівського випромінювання впливають умови отримання і ступінь заповнення пустот опалових матриць, а також умови проведення експериментів (кут отримання рентгенівського випромінювання по відношенню до лазерного, занурювання зразка у рідкий азот).

Ключові слова: опалові матриці, лазерне випромінювання, рентгенівське випромінювання, енергетичний спектр.

А. Ф. БЕЛЯНИН<sup>1</sup>, В. В. БОРИСОВ<sup>2</sup>,  
В. В. ПОПОВ<sup>3</sup>

Россия, г. Москва, <sup>1</sup>ЦНИТИ «Техномаш»,

<sup>2</sup>НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына,

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

E-mail: belyanin@cnitit.ru

## РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ВЫЗВАННОЕ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ОПАЛОВЫЕ МАТРИЦЫ

*В настоящее время материалы с фотонными запрещенными зонами (фотонные кристаллы), т. е. материалы с периодическим (порядка длины волны света) изменением диэлектрической проницаемости, являются объектом активных теоретических и экспериментальных исследований. Для практического применения интересны фотонные кристаллы на основе опаловых матриц (ОМ), которые представляют собой плотнейшую 3D-упаковку одинаковых по диаметру наночастиц аморфного  $\text{SiO}_2$ . Наибольший интерес вызывает применение ОМ в малоисследованной области — генерации рентгеновского излучения при лазерном воздействии на вещество.*

*В настоящей работе представлены результаты исследования с помощью рентгеновского спектрометра энергетических спектров рентгеновского излучения, индуцированного воздействием на опаловые матрицы импульсного лазерного излучения с различной длиной волны  $\lambda$ : 1040 нм (ИК-область спектра), 510 и 578 нм (совмещенные моды) и 366 нм (УФ-область).*

*ОМ синтезировали из раствора гидроксида аммония ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), этанола ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) и тетраэфира ортокремниевой кислоты ( $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ). Упаковка шаров  $\text{SiO}_2$  содержала 3D-систему сообщающихся октаэдрических и тетраэдрических междоузлий, занимающих примерно 26% общего объема. Образцы для исследований представляли собой пластины толщиной 1,5–5,0 мм, которые получали с помощью сухой механической обработки из объемных ОМ, не упрочненных и упрочненных при отжиге до 1475 К на воздухе.*

*Рентгеновское излучение, возникающее при лазерном воздействии на ОМ, регистрировали фотопленкой и гамма-спектрометром. Регистрация проводилась двумя способами. В первом случае лазерное излучение проходило через ОМ (съемка на просвет) и его направление совпадало с направлением индуцированного рентгеновского излучения ( $\varphi = 0^\circ$ ). Во втором регистрируемое рентгеновское излучение было перпендикулярно лазерному ( $\varphi = 90^\circ$ ), а ОМ размещали между пластинами из монокристаллического  $\text{LiNbO}_3$ . В ряде экспериментов для уменьшения теплового воздействия на ОМ от лазерного излучения междоузлия заполняли водой или же погружали образцы в жидкий азот.*

*По результатам спектральных исследований было установлено, что индуцированное рентгеновское излучение является малоинтенсивным мягким рентгеновским излучением с энергией квантов 0,08–2,47 кэВ и с длиной волн  $\lambda_{\text{PH}} = 15,2–0,5$  нм.*

*Спектр рентгеновского излучения при  $\lambda = 355$  нм показал наличие дополнительного более коротковолнового пика  $\lambda_{\text{PH}} = 1,2$  нм по сравнению с  $\lambda_{\text{PH}} = 15,2$  нм, полученном при  $\lambda = 1040$  нм. Еще более коротковолновой пик  $\lambda_{\text{PH}} = 0,5$  нм наблюдался при использовании лазерного источника, работающего с совмещенными излучениями с  $\lambda = 510$  нм и  $\lambda = 578$  нм.*

*При воздействии на ОМ лазерного излучения с  $\lambda = 1040$  нм индуцированное рентгеновское излучение рассеивалось сильнее, чем при  $\lambda = 355$  нм. Воздействие на ОМ лазерного излучения УФ-области вызывало интенсивную люминесценцию ОМ в диапазоне видимого света.*

*Показано, что на параметры рентгеновского излучения влияют условия получения и степень заполнения пустот опаловых матриц, а также условия проведения экспериментов (угол получения рентгеновского излучения по отношению к лазерному, погружение образца в жидкий азот).*

*Ключевые слова: опаловые матрицы, лазерное излучение, рентгеновское излучение, энергетический спектр.*

### Cite the article as:

Belyanin A. F., Borisov V. V., Popov V. V. X-ray radiation during pulsed laser treatment of opal matrices. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature, 2018, no. 5-6, pp. 10-16. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.10>

К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, А. Г. ЮРКЕВИЧ, В. С. СЕВАСТЬЯНОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: koa@onu.ua

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СИНХРОКОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИ ДЕКОДЕРА С СОГЛАСОВАННОЙ ОБРАБОТКОЙ

*Проведен анализ корректирующей способности модели декодера с согласованной обработкой для кодов Баркера различной длины в условиях возникновения одно-, двух- и трехкратной ошибки. Рассмотрена возможность применения последовательностей Баркера различной длины и M-последовательностей в качестве корректирующих синхрокодов. Получена аналитическая зависимость корректирующей способности кода от его длины и от уровня боковых лепестков неперiodической автокорреляционной функции.*

**Ключевые слова:** синхрокод, код Баркера, M-последовательность, согласованная обработка.

Бинарные апериодические последовательности с хорошими корреляционными свойствами [1] представляют большой интерес для разработчиков радиолокационных устройств, поскольку позволяют разрешить основное противоречие между максимальной дальностью обнаружения цели и точностью радиодальнометрии [2–4]. Основным критерием качества таких последовательностей является минимаксный критерий, когда в качестве оценочной функции используется наименьшее возможное значение максимального бокового лепестка неперiodической автокорреляционной функции (**НАКФ**). На сегодняшний день не существует универсального способа построения последовательностей, полученных с учетом данного критерия, а регулярные методы синтеза минимаксных бинарных последовательностей описаны только для нечетных значений длины  $N = 2^k - 1$ , где  $k \geq 3$ , поэтому основным методом построения минимаксных бинарных последовательностей является метод компьютерного перебора.

В задачах связи, особенно при реализации кодового разделения каналов, также активно используются минимаксные последовательности для обеспечения надежности синхронизации потоков данных [5–8]. При этом на первую позицию выходит критерий обеспечения требуемой корректирующей способности при заданной относительной скорости информационного потока для выбранной минимаксной последовательности. В [9] проведен анализ корректирующей способности декодера синхросигнала с согласованной обработкой на основе последовательностей Баркера длиной 7 и 11. В результате моде-

лирования установлено, например, что последовательность Баркера длиной 11 способна корректировать все ошибки до кратности 2 включительно. При этом, однако, в [9] не проведено моделирование для самого помехоустойчивого кода Баркера длиной 13 и, кроме того, не учитывается возможность реализации сигнала с ошибками большей кратности, которые данные последовательности способны корректировать. Также необходимо отметить, что в [9] отсутствует аналитическое выражение, позволяющее оценивать корректирующую способность минимаксных последовательностей, длина которых больше рассмотренных в статье.

Очевидно, что чем больше длина синхрокода, тем большую помехоустойчивость он обеспечивает. С другой стороны, с ростом длины возрастает сложность технической реализации декодера и снижается скорость передачи данных. То есть при разработке системы передачи информации необходимо искать компромисс между сложностью технической реализации декодера и требуемой помехоустойчивостью, и для решения такой задачи необходимо провести исследование корректирующей способности бинарных синхрокодов.

Целью настоящей работы было исследование корректирующей способности бинарных последовательностей с хорошими неперiodическими автокорреляционными свойствами при использовании схемы приема с согласованной обработкой.

### Постановка задачи

В общем случае под корректирующей способностью подразумевается возможность кода обна-

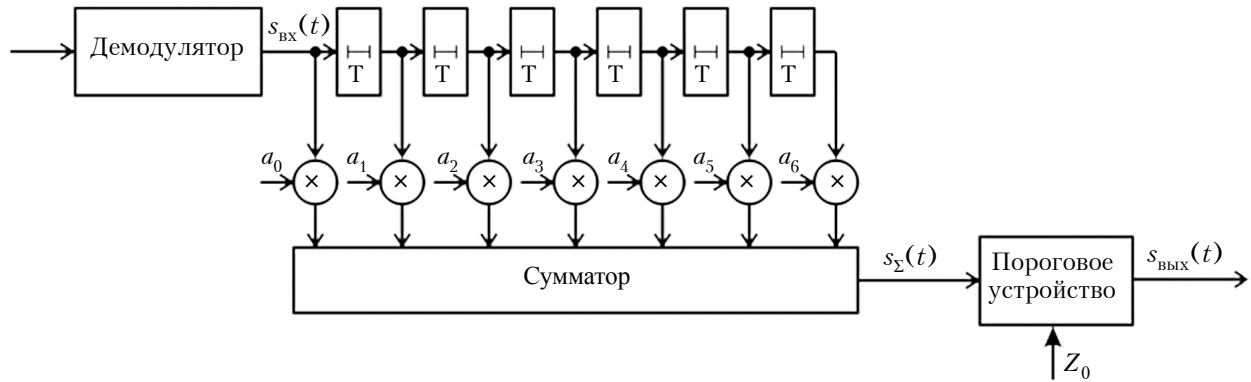


Рис. 1. Типовая структурная схема с применением СФ для кода Баркера длиной 7 [10, 11]:

$T$  — линия задержки на один такт;  $\times$  — блок умножения на весовые коэффициенты  $a_i$  ( $i = 0, 1, \dots, 6$ ;  $a_i = \{-1, 1, -1, -1, 1, 1, 1\}$ )

руживать и исправлять ошибки. Для выделения синхросигнала в схеме приема с согласованной обработкой используется согласованный фильтр (СФ), работающий на видеочастоте, поэтому критерием исправления ошибок в этом случае является превышение главным максимумом отклика СФ уровня боковых лепестков в момент окончания сигнала, что можно описать следующим выражением:

$$\begin{cases} R_{\text{ГЛ max}} \geq N / 2; \\ |R_{\text{БЛ max}}| < N / 2, \end{cases} \quad (1)$$

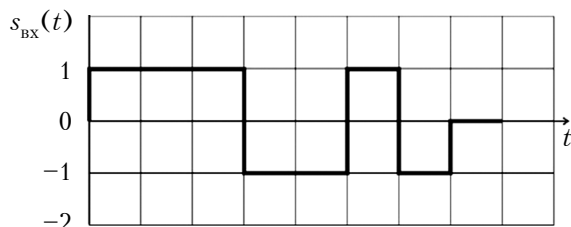


Рис. 2. Выходной сигнал демодулятора

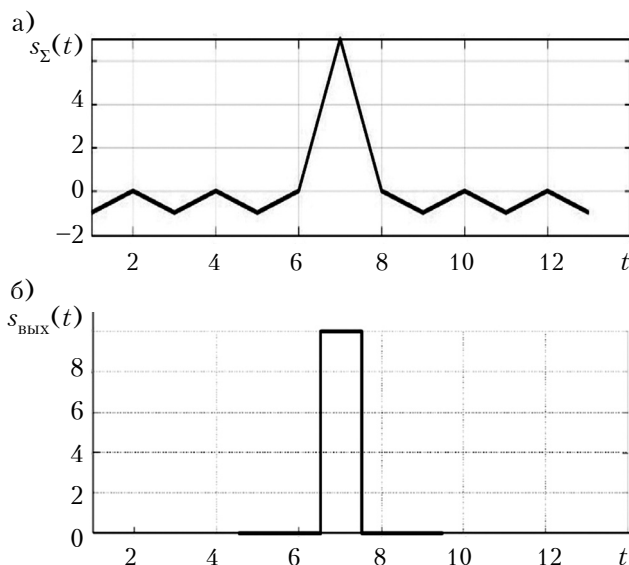


Рис. 3. Сигнал на выходе сумматора (а) и на выходе порогового устройства (б)

где  $R_{\text{ГЛ max}}$  — главный максимум рассматриваемой НАКФ, равный главному пику  $R(0)$ , т. е.  $R_{\text{ГЛ max}} = R(0)$ ;

$R_{\text{БЛ max}}$  — абсолютный максимум боковых лепестков.

Структурная схема устройства обнаружения синхросигнала с применением СФ для кода Баркера длиной 7 приведена на рис. 1. В данной схеме на выходе демодулятора образуется видеосигнал  $s_{\text{вх}}(t)$ , приведенный на рис. 2, а после сумматора — отклик  $s_{\Sigma}(t)$ , показанный на рис. 3, а [12]. Импульс  $s_{\text{вых}}(t)$ , возникающий на выходе порогового устройства (рис. 3, б), представляет собой выходной сигнал декодера. Критерием для обнаружения ошибки является изменение положения либо отсутствие импульса в требуемый момент времени  $t$ .

#### Моделирование прохождения синхросигнала с ошибками различной кратности

Для оценки корректирующей способности низкочастотной части схемы СФ, представленной на рис. 1, для известных кодов Баркера длиной 7, 11 и 13 [13, с. 273–287; 14] было проведено моделирование прохождения синхросигнала через согласованный фильтр с ошибками различной кратности  $r$ . Отклики СФ получали при последовательном внесении ошибок во все сигнальные позиции исходных последовательностей Баркера.

##### Однократная ошибка

Анализ результатов моделирования прохождения синхросигнала через СФ с однократной ошибкой ( $r = 1$ ), приведенных на рис. 4, показывает, что в соответствии с критерием (1) однократные ошибки корректируются при поражении помехой любой сигнальной позиции. Значения отношения главного пика к максимальному уровню боковых лепестков  $R(0) / |R_{\text{БЛ max}}|$  сведены в табл. 1.



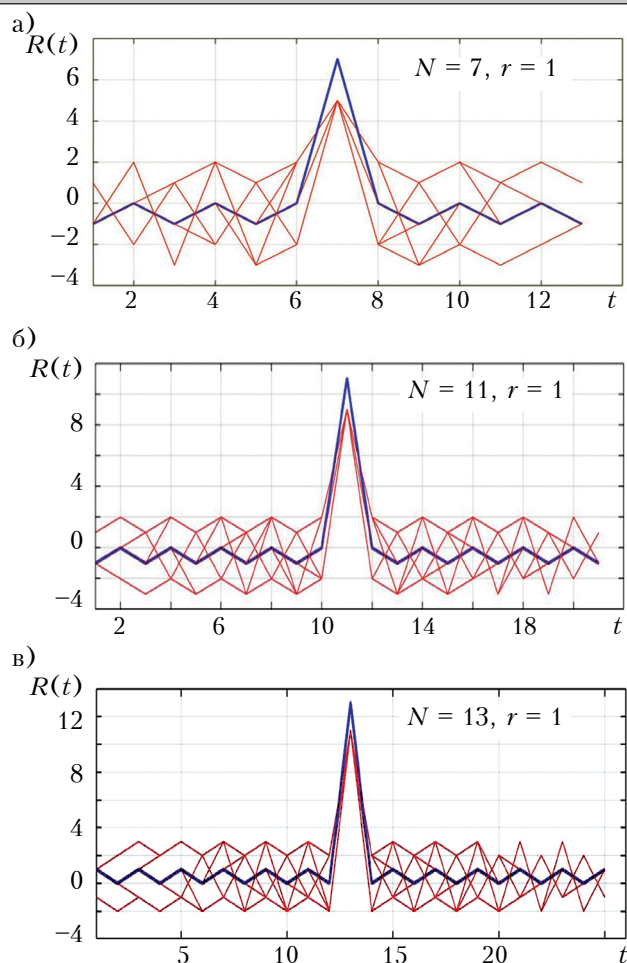


Рис. 4. Отклики на выходе СФ при прохождении через него сигнала длиной  $N$  с однократной ошибкой (тонкие линии) и без ошибки (толстая линия)

Таблица 1

Значение отношения главного пика к максимальному уровню боковых лепестков для кодов разной длины при  $r = 1$

$N$	$R(0) /  R_{\text{БЛ max}} $
7	5/3
11	9/3
13	11/3

#### Двукратная ошибка

Вероятность  $P_{\text{кор}}$  исправления двукратной ошибки ( $r = 2$ ) определяется отношением числа реализаций сигнала с помехой, при которых происходит исправление ошибки ( $V_{\text{кор}}$ ), к числу всех возможных реализаций ( $V_{\text{шум}}$ ):

$$P_{\text{кор}} = V_{\text{кор}} / V_{\text{шум}}, \quad (2)$$

при этом вероятность ошибки вычисляется как  $P_{\text{ош}} = 1 - P_{\text{кор}}$ .

Для двукратной ошибки значение  $V_{\text{шум}}$  определяется величиной  $A_N^{(2)}$  — числом размещений

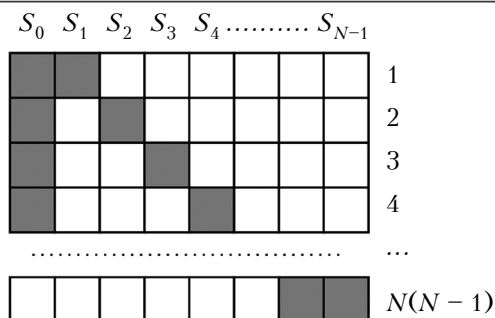


Рис. 5. Возможные варианты реализации (от 1 до  $N(N-1)$ ) двукратной ошибки (темные ячейки), которые произошли в различных сигнальных позициях  $S_i$

в  $N$  позициях двух неперекрывающихся элементов ошибки, т. е.  $V_{\text{шум}} = A_N^{(2)}$ . В данном случае  $A_N^{(2)} = N(N-1)$ . (3)

Варианты реализации двукратных ошибок показаны на рис. 5.

Результаты моделирования приведены на рис. 6, а показатели корректирующей способности кодов сведены в табл. 2.

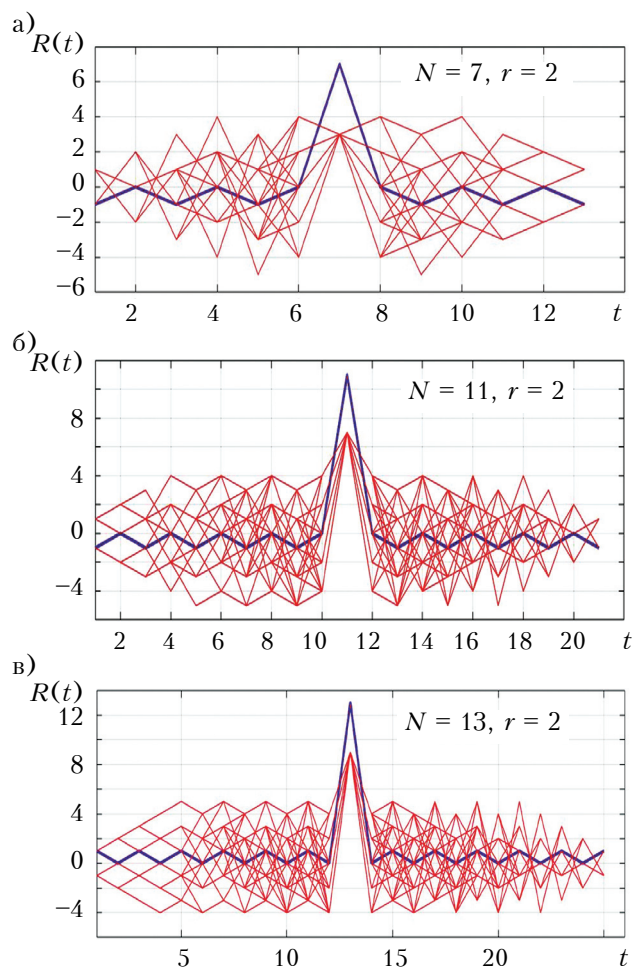


Рис. 6. Отклики на выходе СФ при прохождении через него сигнала длиной  $N$  с двукратной ошибкой (тонкие линии) и без ошибки (толстая линия)

Таблица 2

Показатели корректирующей способности кодов разной длины при  $r = 2$

$N$	$V_{\text{шум}}$	$V_{\text{кор}}$	$P_{\text{кор}}$
7	42	10	10/42
11	110	110	1
13	156	156	1

Анализ приведенных данных показывает, что для схемы декодера на рис. 1 двукратная ошибка исправляется при длине кодов Баркера 11 и 13 и не исправляется при  $N = 7$ .

#### Трехкратная ошибка

В случае трехкратной ошибки ( $r = 3$ ) значение  $V_{\text{шум}}$  определяется числом размещений в  $N$  позициях трех неперекрывающихся элементов ошибки, которая вычисляется как

$$A_N^{(3)} = N(N-1)(N-2). \quad (4)$$

Из анализа результатов моделирования, приведенных на рис. 7 и в табл. 3, видно, что трех-

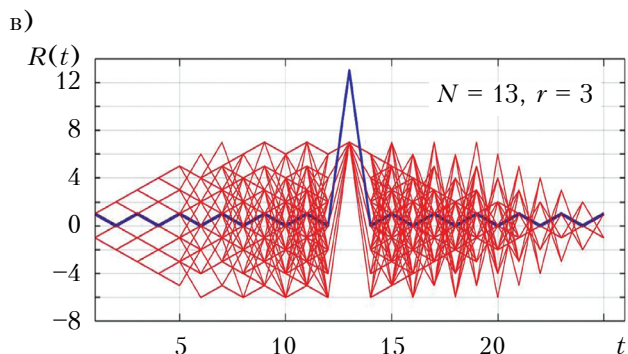
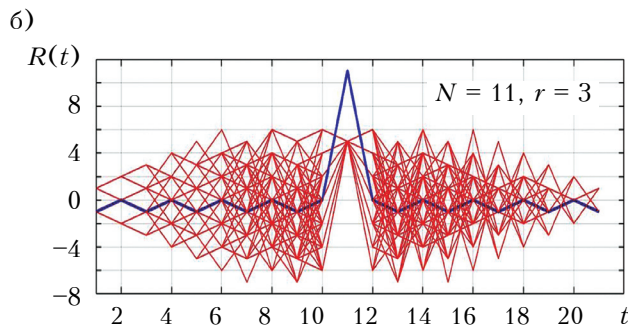
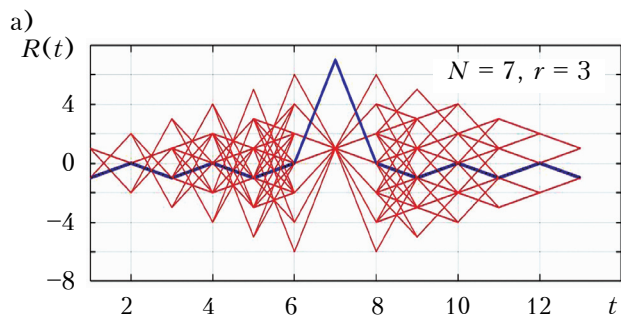


Рис. 7. Отклики на выходе СФ при прохождении через него сигнала длиной  $N$  с трехкратной ошибкой (тонкие линии) и без ошибки (толстая линия)

Таблица 3

Показатели корректирующей способности кодов разной длины при  $r = 3$

$N$	$V_{\text{шум}}$	$V_{\text{кор}}$	$P_{\text{кор}}$
7	210	0	0
11	990	576	576 / 990
13	1716	1416	1416 / 1716

кратную ошибку не могут исправить даже последовательности Баркера длиной 13.

#### Корректирующая способность бинарных минимаксных последовательностей произвольной длины

В общем виде число размещений в  $N$  позициях  $r$  неперекрывающихся элементов ошибки составляет

$$A_N^{(r)} = \frac{N!}{(N-r)!} = N(N-1)(N-2)\dots(N-(r-1)). \quad (5)$$

Поскольку ошибка представляет собой переход элемента видеопоследовательности из уровня  $-1$  в  $1$ , или наоборот, что соответствует переходу фазы (фазовой ошибки) из уровня  $\pi$  в уровень  $0$ , и наоборот, можно заключить, что при наличии ошибок кратности  $r$  величины максимального лепестка  $R_{\text{max}}$  и бокового лепестка  $R_{\text{БЛ max}}$  связаны следующими соотношениями:

$$\begin{cases} R_{\text{max}} = N - 2r; \\ R_{\text{бок } r} = R_{\text{БЛ max}} + 2r, \end{cases} \quad (6)$$

$R_{\text{бок } r}$  — величина бокового лепестка НАКФ при наличии ошибки кратности  $r$ .

Поскольку  $R_{\text{max}} = R_{\text{бок } r}$ , отсюда следует, что кратность исправляемой ошибки вычисляется как

$$r = (N - R_{\text{БЛ max}}) / 4. \quad (7)$$

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что полученное соотношение справедливо для любых бинарных последовательностей произвольной длины с элементами «+1» и «-1».

Как уже отмечалось, кроме кодов Баркера хорошей НАКФ характеризуются также  $M$ -последовательности, последовательности Касами, Голда и др., которые, однако, существуют только для нечетных значений  $N = 2k - 1$ , где  $k = 3$ . При этом в [15] методом «шумового» перебора определен ряд бинарных последовательностей различной длины из диапазона от 4 до 128 с наилучшими НАКФ, среди которых присутствуют коды Баркера длиной 7, 11, 13 и  $M$ -последовательности длиной 7, 15, 31, 63, 127. Тогда, используя соотношение (7), можно легко определить корректирующую способность кода для любой длины из требуемого диапазо-

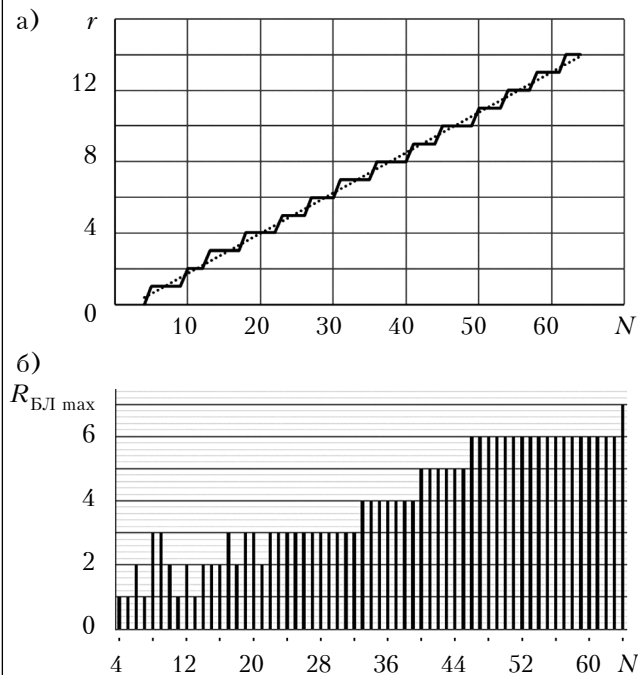


Рис. 8. Зависимости корректирующей способности кода (а) и максимального уровня бокового лепестка (б) от длины синхрокода

на, например для  $N = 64$  кратность исправляемой ошибки составит  $r = 14$ .

Из приведенных на рис. 8 графиков видно, что зависимость корректирующей способности кода от его длины носит ступенчатый характер, а значит, в пределах «ступеньки» синхрокод меньшей длины (например,  $N = 36$ ) обладает такой же корректирующей способностью ( $r = 8$ ), что и код большей длины ( $N = 40$ ). Это дает возможность повысить скорость передачи информации при одновременном снижении сложности декодера.

### Выводы

Таким образом, полученные аналитические выражения, связывающие вероятность ошибки декодирования с длиной синхрокода, позволяют разработчику аппаратуры мобильной связи проводить комплексную оценку помехоустойчивости системы приема сигнала с учетом сигналов синхронизации. Установленный факт существования диапазонов длины минимаксных последовательностей, в пределах которых их корректирующая способность остается постоянной, позволяет выбирать сигнально-кодovou конструкцию минимально возможной для заданных условий длины с целью увеличения скорости передачи информации по каналу связи. Предложенный подход может быть успешно использован для модификации существующих схем синхронизации систем связи с кодовым разделением каналов с целью их оптимизации.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Едемский В.А. Синтез чередующихся троичных последовательностей с хорошими автокорреляционными свойствами и высокой эквивалентной линейной сложностью // Журнал Радиоэлектроники. — 2014. — № 2. — <http://jre.cplire.ru/jre/feb14/2/text.html>
- Коренчук А. С., Дмитриев В. Ф. Применение сигналов с кодами Баркера для опроса радиометок на ПАВ в системах радиочастотной идентификации // Радиопромышленность. — 2016. — № 2. — С. 29–35. <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2016-2-29-35>
- Банкет В.Л., Токарь М.С. Композитные коды Баркера // Сб. научных трудов «Цифровые технологии». — 2007. — № 2. — С. 8–18. <https://ojs.onat.edu.ua/index.php/digitech/article/view/592>
- Потехин Е.Н., Шувалов А.С., Леухин А.Н. Методы и результаты синтеза аperiodических бинарных последовательностей и многофазных последовательностей Баркера // Цифровая обработка сигналов. — 2013. — Вып. 4. — С. 45–54.
- Ашихина А.В. Исследование свойств двоичных кодовых последовательностей для использования в глобальной навигационной спутниковой системе ГЛОНАСС // Сб. трудов МНПК «Перспективы развития современных математических и естественных наук». — Россия, г. Воронеж. — 2015. — С. 108.
- Darwich T., Cavanaugh Ch. Amplitude shifting for sidelobes cancellation pulse compression // 2006 CIE International Conference on Radar. — China, Shanghai. — <http://dx.doi.org/10.1109/ICR.2006.343579>
- Поправко Е.Д., Марушенко С.Г. Программная реализация поиска кодовых последовательностей с заданными корреляционными свойствами // Международный студенческий научный вестник. — 2015. — № 1. — URL: <http://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=12235>
- Юдачев С. С., Калмыков В. В. Ансамбли последовательностей GMW для систем с кодовым разделением каналов // Наука и образование. — 2012. — № 1.
- Шпинковский А.А., Шпинковская М.И. Способ синхронизации передаваемой информации с помощью псевдослучайных последовательностей // Автоматизация технологических та бизнес-процесів. — 2014. — № 17. — С. 33–36.
- 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>
- Kiranmai B., Rajesh Kumar P. Performance evaluation of compound Barker codes using cascaded mismatched filter technique // Int. Journal of Computer Application. — 2015. — Vol. 121, N 19. — P. 31–34. — <http://dx.doi.org/10.5120/21649-4844>
- Садченко А.В., Кушниренко О.А., Кошелев Е.К., Бондар В.И. Быстродействующий алгоритм восстановления несущей частоты и кадровой синхронизации в модемах с QPSK-модуляцией // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2018. — № 1. — С. 28–35. — <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.1.28>
- Barker R. H. Group Synchronizing of Binary Digital Sequences // In Communication Theory. — London: Butterworth, 1953. — P. 273–287.
- Kiranmai B., Rajesh Kumar P. Performance evaluation of Barker codes using new pulse compression technique // International Journal of Computer Applications. — 2014. — Vol. 107, N 20. — P. 24–27. — <http://dx.doi.org/10.5120/18869-0417>
- 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). — P. 97–103. — <http://dx.doi.org/10.15276/opu.3.47.2015.14>

Дата поступления рукописи  
в редакцию 02.10.2018 г.



А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО,  
А. Г. ЮРКЕВИЧ, В. С. СЕВАСТЬЯНОВ

Україна, Одеський національний політехнічний університет  
E-mail: koa@opu.ua

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОРИГУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИНХРОКОДІВ ДЛЯ МОДЕЛІ ДЕКОДЕРУ З УЗГОДЖЕНОЮ ОБРОБКОЮ

*Для підвищення надійності роботи схем кадрової синхронізації систем зв'язку в умовах завад застосовуються синхропослідовності, оптимальні за мінімаксним критерієм, з найкращим відношенням максимального рівня бічної пелюстки до головного піку неперіодичної автокореляційної функції. Очевидно, що чим більше довжина мінімаксної послідовності, тим вище її коригувальна здатність. Однак з ростом довжини синхрокоду виникає суперечність між коректуючою здатністю і швидкістю передачі інформації через зменшення тривалості інформаційної ділянки кадру. Крім того, зі зростанням довжини коду також зростає складність технічної реалізації схеми синхронізації декодера. Тобто під час розробки системи передачі інформації необхідно шукати компроміс між складністю технічної реалізації декодера та необхідною завадостійкістю, і для вирішення такого завдання необхідно провести дослідження коректуючої здатності бінарних синхрокодів.*

*Метою даної роботи було дослідження коректуючої здатності бінарних послідовностей з хорошими неперіодичними автокореляційними властивостями при використанні схеми прийому з узгодженою обробкою.*

*Розглянуто можливість застосування послідовностей Баркера довжиною 7, 11 і 13 та M-послідовностей як коригувальних синхрокодів.*

*Проведено аналіз коректуючої здатності моделі декодера з узгодженою обробкою для кодів Баркера різної довжини в умовах виникнення одно-, дво- та трикратної помилки і отримано аналітичні вирази, що дозволяють визначити ймовірність помилки декодування бінарного мінімаксного коду залежно від довжини синхрокоду.*

*Отримано залежність коректуючої здатності коду і максимального рівня бічних пелюстків від довжини синхрокоду в діапазоні від 4 до 128 з найкращими неперіодичними автокореляційними функціями. Встановлено, що існують діапазони довжини мінімаксних послідовностей, в межах яких їх коригувальна здатність залишається постійною, тобто синхрокод меншої довжини має таку ж коректуючу здатність, що і код більшої довжини.*

*Таким чином, результати проведених досліджень дозволяють оптимізувати складність технічної реалізації декодера синхросигналу залежно від вимог до загальної завадостійкості і швидкості передачі інформації в системі зв'язку. Запропонований підхід може бути успішно використаний для модифікації існуючих схем синхронізації систем зв'язку з кодовим розподілом каналів з метою їхньої оптимізації.*

**Ключові слова:** синхрокод, M-послідовність, узгоджена обробка, код Баркера.

DOI: 10.15222/TKEA2018.5-6.17  
UDC 621.396.66

A. V. SADCHENKO, O. A. KUSHNIRENKO,  
A. G. YURKEVYCH, V. S. SEVASTIANOV

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

## STUDY OF THE CORRECTIVE ABILITY OF SYNC CODES FOR THE MATCHED PROCESSING DECODER

*Increase of the operation reliability of the frame synchronization schemes of communication systems affected by interferences might be achieved by using sync sequences optimal according to the minimax criterion and having the best ratio of the maximum side-lobe level to the main peak of the non-periodic autocorrelation function. Obviously, the longer the minimax sequence, the higher its correction ability. However, with the increase in the length of the sync code, a conflict arises between the corrective ability and the speed of data transfer. This is caused by the decrease in the duration of the information section of the frame. At the same time, as the length of the code increases, the complexity of the technical implementation of the decoder synchronization scheme increases as well.*



*This means that when developing an information transmission system, it is necessary to find a compromise between the complexity of the technical implementation of the decoder and the required noise immunity. To solve this problem, it is necessary to study the correcting ability of binary sync codes.*

*The purpose of this work was to study the correcting ability of binary sequences with good non-periodic autocorrelation properties using a reception scheme with matched processing.*

*This article discusses the possibility of using Barker sequences of lengths 7, 11, and 13 and M-sequences as corrective sync codes.*

*The authors carry out an analysis of the correcting ability of the decoder model with matched processing for Barker codes of different lengths under the conditions of a one, two, and threefold error. Analytical expressions have been obtained to determine the decoding error probability of a binary minimax code depending on the length of the sync code.*

*The dependence of the corrective ability of the code and the maximum level of the side lobe on the length of the sync code in the range from 4 to 128 with the best nonperiodic autocorrelation functions (NPAF) is obtained.*

*It has been established that there are length ranges for minimax sequences within which their correction ability remains constant, that is, a sync code of shorter length has the same correction ability as a longer code.*

*Thus, the research results allow us to optimize the complexity of the technical implementation of a sync signal decoder depending on the requirements for general noise immunity and information transfer rate in a communication system. The proposed approach can be successfully used to modify the existing synchronization schemes of communication systems with code division of channels.*

**Keywords:** sync code, M-sequence, matched processing, Barker code.

## REFERENCES

1. Edemskii V.A. [Synthesis of alternating ternary sequences with good autocorrelation properties and high equivalent linear complexity]. *Journal of Radio Electronics*, 2014, no. 2. <http://jre.cplire.ru/jre/feb14/2/text.html> (Rus)
2. Korenchuk A. S., Dmitriev V. F. Interrogation of saw tags in RFID systems using Barker encoded signals. *Radio industry*, 2016, no. 2, pp. 29-35. <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2016-2-29-35> (Rus)
3. Banket V.L., Tokar' M.S. [Barker composite codes]. *Collected Works "Digital technologies"*, 2007, no. 2, pp. 8-18. <https://ojs.onat.edu.ua/index.php/digitech/article/view/592> (Rus)
4. Potekhin E., Shuvalov A., Leukhin N. Methods and results synthesis of aperiodic binary sequences and polyphase Barker sequences. *Digital Signal Processing*, 2013, iss 4, pp. 45-54. (Rus)
5. Ashikhina A.V. [Investigation of the properties of binary code sequences for use in the global navigation satellite system GLONASS]. *Proc. of conf. "Prospects for the Development of Modern Mathematical and Natural Sciences"*, Russia, Voronezh, 2015, p. 108. (Rus)
6. Darwich T., Cavanaugh Ch. Amplitude shifting for sidelobes cancellation pulse compression // 2006 CIE International Conference on Radar.— China, Shanghai.— <http://dx.doi.org/10.1109/ICR.2006.343579>
7. Popravko E.D., Marushchenko S.G. [Software implementation of the search code sequences with given correlation properties]. *Mezhdunarodnyi Studencheskii Nauchnyi Vestnik*, 2015, no. 1. URL: <http://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=12235> (Access date 24.10.2018)
8. Yudachev S. S., Kalmykov V. V. *Science and Education*, 2012, no. 1. (Rus)
9. Shpinkovskii A.A., Shpinkovskaya M.I. [The method of synchronization of transmitted information using pseudo-random sequences]. *Automatization of Technological and Business Processes*, 2014, no. 17, pp. 33-36. URL: <http://journals.uran.ua/atbp/article/view/26328/23709> (Access date 24.10.2018) (Rus)
10. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A. et al. Correlation scheme of frame synchronization in communication systems with QPSK-modulation. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2017, no. 6, pp. 22-28. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.6.22> (Rus)
11. Kiranmai B., Rajesh Kumar P. Performance evaluation of compound Barker codes using cascaded mismatched filter technique. *Int. Journal of Computer Application*, 2015, vol. 121, no. 19, pp. 31-34. <http://dx.doi.org/10.5120/21649-4844>
12. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A. et al. High-speed algorithm for carrier frequency recovery and frame synchronization in QPSK-modulated modems. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 1, pp. 28-35. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.1.28> (Rus)
13. Barker R. H. Group Synchronizing of Binary Digital Sequences. In book *"Communication Theory"*, London, Butterworth, 1953.
14. Kiranmai B., Rajesh Kumar P. Performance evaluation of Barker codes using new pulse compression technique. *International Journal of Computer Applications*, 2014, vol. 107, no. 20, pp. 24-27. <http://dx.doi.org/10.5120/18869-0417>
15. 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>

**Описание статьи для цитирования:**

Садченко А. В., Кушниренко О. А., Юркевич А. Г., Севастьянов В. С. Исследование корректирующей способности синхрокодов для модели декодера с согласованной обработкой. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 5-6, с. 17-23. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.17>

**Cite the article as:**

Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Yurkevych A. G., Sevastianov V. S. Study of the corrective ability of sync codes for the matched processing decoder. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 5-6, pp. 17-23. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.17>

К. т. н. І. П. МАКСИМІВ, С. І. АЛТУНІН, д. т. н. А. П. БОНДАРЄВ,  
д. т. н. І. В. ГОРБАТИЙ

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: ivan.p.maksymiv@lpnu.ua

## ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДЕТЕКТОРА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРИЙМАННЯ РАДІОСИГНАЛІВ ЗІ СКЛАДНОЮ ФАЗОВОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

*Наведено результати дослідження впливу параметрів детектора, реалізованого на базі пристрою фазового автопідстроювання частоти, на його ефективність. Проведено математичне моделювання сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією 8-QAM та досліджено вплив параметрів пристрою фазового автопідстроювання частоти на якість приймання цих сигналів за умови дії завади у каналі зв'язку. Визначено найбільш прийнятні параметри, що забезпечують максимальну завадостійкість системи зв'язку, що використовує складні види фазової модуляції сигналів.*

**Ключові слова:** 8-QAM, фазовий детектор, ФАПЧ, завадостійкість.

Невід'ємною складовою сучасних приймачів цифрових радіосигналів є пристрої фазового автопідстроювання частоти (**ФАПЧ**). Пристрої ФАПЧ мають декілька застосувань, зокрема їх використовують для частотної фільтрації, частотної модуляції та демодуляції, множення та перетворення частоти сигналу, виділення опорного колювання для когерентного детектування. Пристрої ФАПЧ застосовують у широкій області радіоелектроніки, починаючи від мобільних телефонів та закінчуючи системами космічного зв'язку. Це зумовлено тим, що ці пристрої є порівняно простими та дешевими у схемотехнічній реалізації.

Сучасні системи радіозв'язку використовують сигнали зі складними видами модуляції з метою ефективного використання виділеного частотно-го діапазону.

Метою цієї роботи є визначення діапазону параметрів фільтра ФАПЧ, за яких система зв'язку з модуляцією 8-QAM має найвищу завадостійкість.

### Опис проблеми

Однією з основних проблем сучасних систем стільникового зв'язку є оптимізація якості надання послуг за критеріями відношення сигнал/шум та ймовірність появи помилки. Співвідношення цих параметрів є головним критерієм в оцінці ефективності системи зв'язку [1]. Існує кілька способів його оптимізації, наприклад за допомогою додаткового антенного обладнання, яке б мінімізувало складову багатопроменевого поширення у суміші шумів, що діють у каналі зв'язку [2], чи оптимізованих алгоритмів обробки отриманої суміші сигналу з шумом.

Також набув поширення метод синхронного детектування з використанням пристрою ФАПЧ, який дозволяє оптимізувати якість зв'язку за допомогою стеження за зміною фази отриманого сигналу.

Принцип роботи ФАПЧ полягає у тому, що він порівнює фази вхідного та опорного сигналів і видає сигнал похибки відповідно до різниці між цими фазами. Сигнал похибки проходить далі через фільтр низьких частот (**ФНЧ**) та використовується як керуючий для генератора, керованого напругою. Керований генератор у свою чергу генерує в колі негативний зворотний зв'язок. Якщо вихідна частота відхиляється від опорної, сигнал похибки збільшується за модулем, діючи на генератор у сторону зменшення похибки.

Завдяки простоті та доступності фізичної реалізації, найбільшого поширення у сучасній радіоелектроніці набула схема цифрової ФАПЧ, запропонована Р. Бестом (**рис. 1**) [3]. Ця схема відслідковує напрям зміни фази отриманого сигналу та корегує фазові стрибки, спричинені впливом завад, за допомогою петлі зворотного зв'язку, а відкорегований сигнал подається далі на демодулятор. Передавальна характеристика такого пристрою є наступною:

$$H(z) = \frac{K_p(z-1) + K_i}{(z-1)^2 + K_p(z-1) + K_i}, \quad (1)$$

де  $K_p$ ,  $K_i$  — коефіцієнти пропорційності та інтегрування відповідно.

Схема Р. Беста є найбільш поширеною, проте не єдиною існуючою схемою фізичної реалізації ФАПЧ. У [4] запропоновано концепцію оптимально-узгодженого фільтра прийма-

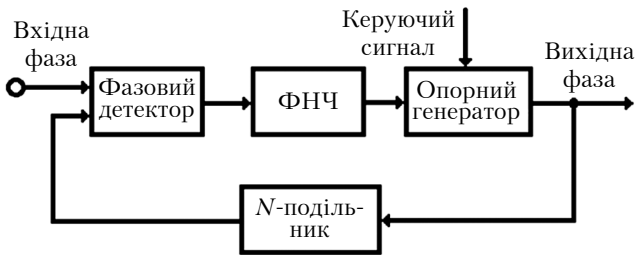


Рис. 1. Структурна схема типового петльового фільтра ФАПЧ

ча радіосигналів з фазовою модуляцією. На базі математичної моделі цього фільтра синтезовано пристрій ФАПЧ (рис. 2) [5], особливістю якого є зменшення величини відхилення фази сигналу за допомогою пропорційно-інтегруючих фільтрів (ПІФ). Передавальна характеристика такого ФАПЧ є наступною:

$$H(p) = \frac{\Omega_y K_0(p)}{p + \Omega_y K_0(p)}, \quad (2)$$

$$\text{де } K_0(p) = \frac{1 + pm_0T_0}{1 + pT_0};$$

$$p = j\omega;$$

$\Omega_y$  — девіація частоти сигналу;

$m_0$  — коефіцієнт пропорційності;

$T_0$  — стала часу фільтра.

З виразу (2) видно, що ефективність роботи схеми на рис. 2 залежить від параметрів використаних у ній фільтрів. Правильний підбір цих параметрів є критично важливим для ефективно роботи такого ФАПЧ, тому необхідно визначити їхні оптимальні значення [6].

Оптимальні значення параметрів фільтра петлі ФАПЧ необхідно підбирати з урахуванням того, що процес детектування буде проходити для сигналів зі складними видами квадратурної модуляції (QAM), поширених у сучасних системах радіозв'язку. Однією з можливих варіацій квадратурної амплітудної модуляції є модуляція 8-QAM, яка дозволяє передавати вісім мож-

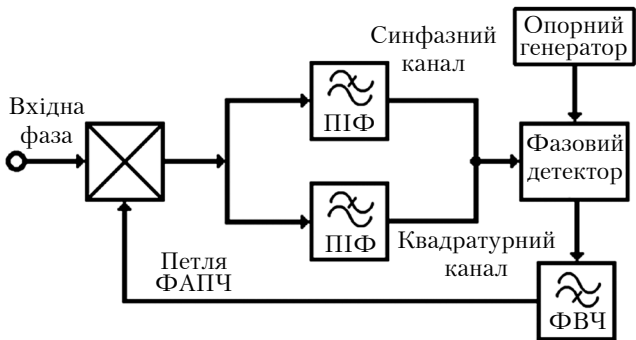


Рис. 2. Структурна схема детектора на базі петльового фільтра ФАПЧ

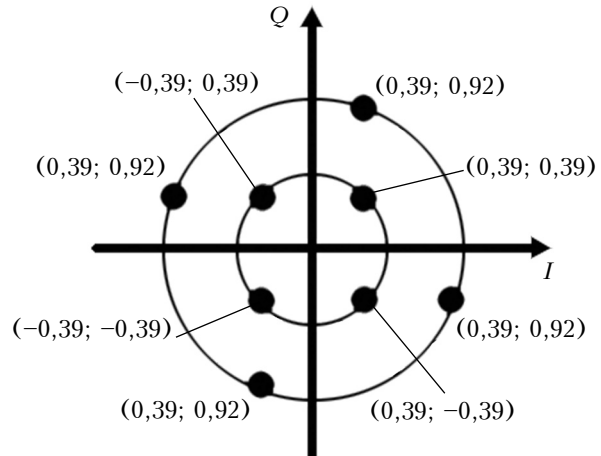


Рис. 3. Сузір'я сигналу з модуляцією 8-QAM

ливих значень фази сигналу, виражених двома значеннями, одне з яких ( $I$ ) є значенням синфазної компоненти, а інше ( $Q$ ) — квадратурної (рис. 3). Її застосовують у цифрових схемах формування радіосигналів. При використанні модуляції 8-QAM два цифрових потоки бітів передаються за допомогою зміни амплітуд двох сигналів-носіїв з застосуванням амплітудної маніпуляції як схеми цифрової модуляції.

У цифровому вигляді значення синфазної та квадратурної компоненти сигналу можна інтерпретувати, використовуючи послідовності з трьох бітів (трибіти), тому проведення імітаційного моделювання такого сигналу реалізовано нами за допомогою програмного забезпечення. Підбір оптимальних параметрів фільтра здійснено за об'єднання програмної реалізації цих сигналів з імітаційною моделлю петльового фільтра ФАПЧ.

### Побудова імітаційної моделі 8-QAM-сигналів

Для побудови 8-QAM-сигналу використане програмне середовище Matlab [7]. Значення кута, амплітуд синфазної та квадратурної компонент сигналу були отримані за допомогою інформаційного цифрового сигналу, який представляє собою послідовність бітів, створену програмно у вигляді масиву. Цю послідовність було розділено на трибіти, та на основі даних табл. 1 було сформовано фазу і амплітуду дійсної та уявної компоненти модульованого сигналу. Отримані значення вносились у двовимірний масив разом зі значеннями часових інтервалів, які задають частоту дискретизації сигналу. На виході було отримано восьмипозиційний інформаційний сигнал (рис. 4, а), готовий до передавання у канал зв'язку. Його фазовий портрет, або сузір'я, (рис. 4, б) відповідає реальному сигналу, що підтверджує адекватність імітаційної моделі.

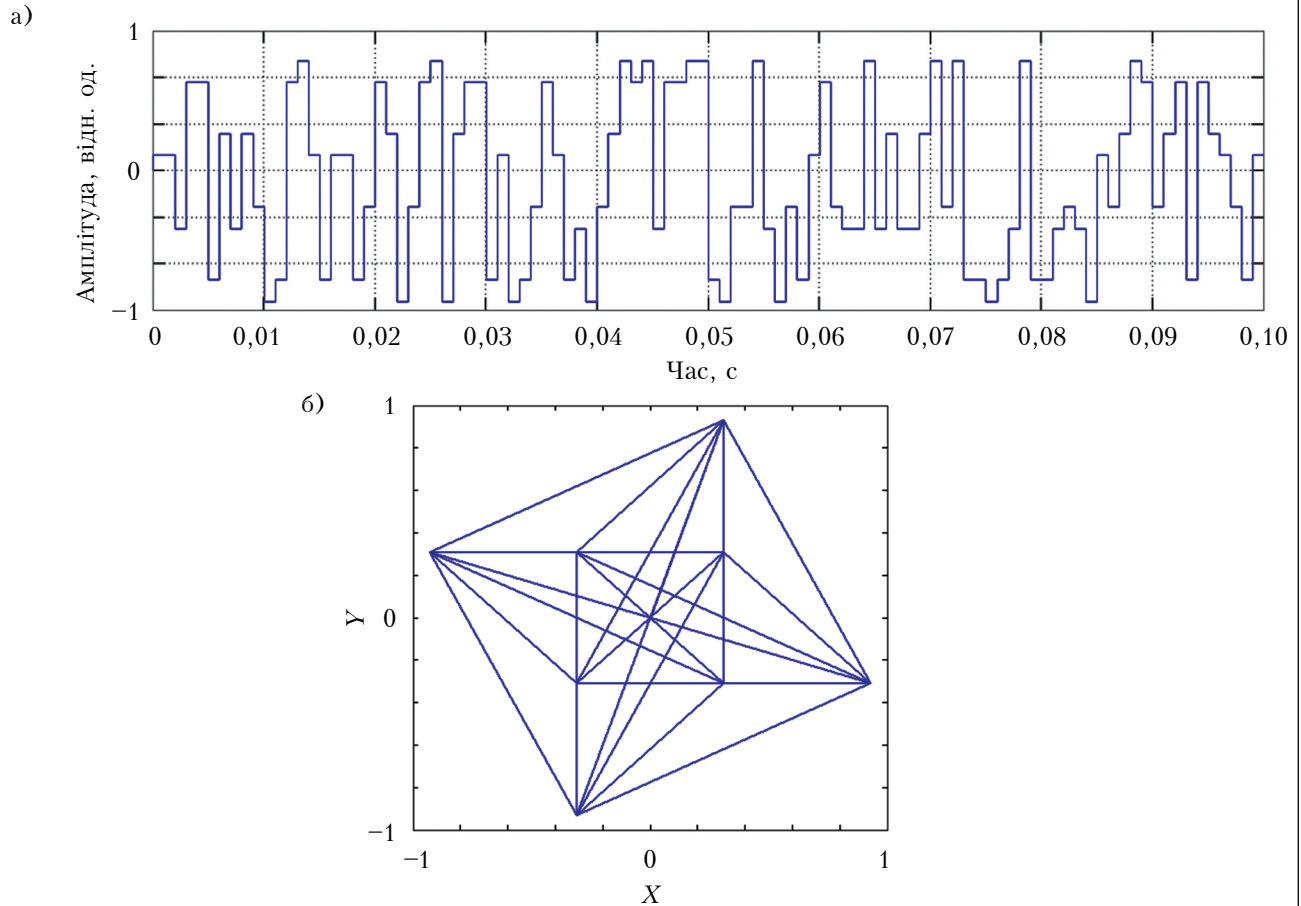


Рис. 4. Часова діаграма (а) та фазовий портрет (б) інформаційного 8-QAM-сигналу

Таблиця 1

Правила модуляції трибітів інформаційного сигналу

Трибіт	Значення фази та складових амплітуди сигналу		
	$\varphi$	$A_I$	$A_Q$
1, 1, 1	$\pi/4$	0,39	0,39
1, 1, 0	$5\pi/12$	0,39	0,92
0, 1, 0	$3\pi/4$	-0,39	0,39
0, 1, 1	$11\pi/12$	-0,92	0,39
0, 0, 1	$5\pi/4$	-0,39	-0,39
1, 0, 0	$17\pi/12$	-0,39	-0,92
0, 0, 0	$7\pi/4$	0,39	-0,39
1, 0, 1	$23\pi/12$	0,92	-0,39

Сформований сигнал було надіслано у канал зв'язку для подальшого дослідження можливостей його детектування детектором на базі ФАПЧ.

#### Побудова імітаційної моделі

Створення та перевірку адекватності імітаційної моделі системи зв'язку з використанням фазового детектора та петлі ФАПЧ засобами програмного забезпечення Matlab було деталь-

но описано у [8, 9]. Нами для проведення досліджень було побудовано аналогічну імітаційну модель, проте без використання модифікованого детектора (рис. 5). Модель складається з наступних компонентів:

- джерело сигналу, яке транслює модульований сигнал, сформований за допомогою імітаційного моделювання;
- канал зв'язку, в якому можна змінювати значення потужності шуму, що накладається на сигнал під час проходження його через канал;
- детектор, побудований на основі пристрою автоматичного підстроювання частоти.

У фільтрі петлі ФАПЧ реалізовано можливість зміни його параметрів, зокрема інерційності фільтра  $T_f$  та коефіцієнта пропорційності  $m$ . Дослідження проводилось за частоти вхідного сигналу  $f_0 = 1000$  Гц, а смугу утримання петлі ФАПЧ було встановлено у чотири рази більшою, тобто  $\Omega_y = 4000$  Гц.

Потужність одного біту вхідного сигналу встановлено  $P_i = 0,001$  Вт.

Шум, що діє в каналі зв'язку, є адитивним гаусовим шумом з можливістю зміни значення його потужності та, відповідно, відношення сигнал/шум у каналі.



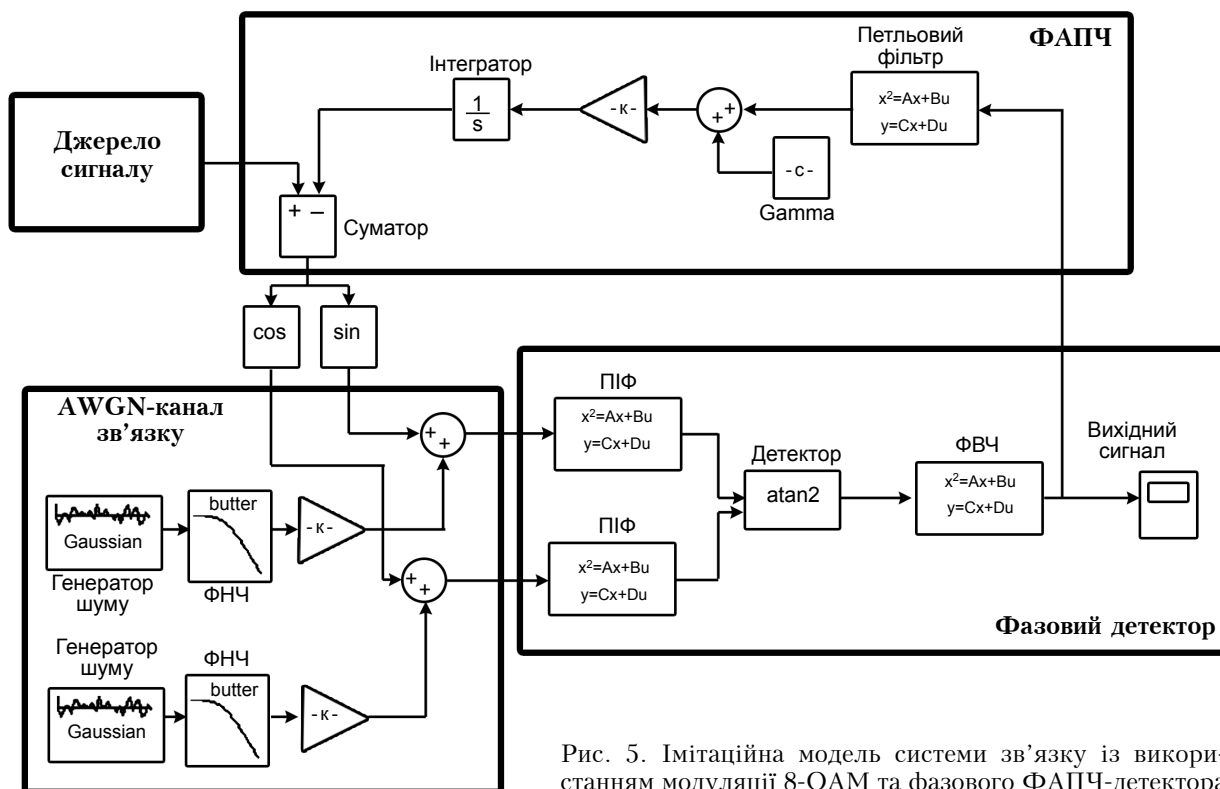


Рис. 5. Імітаційна модель системи зв'язку із використанням модуляції 8-QAM та фазового ФАПЧ-детектора

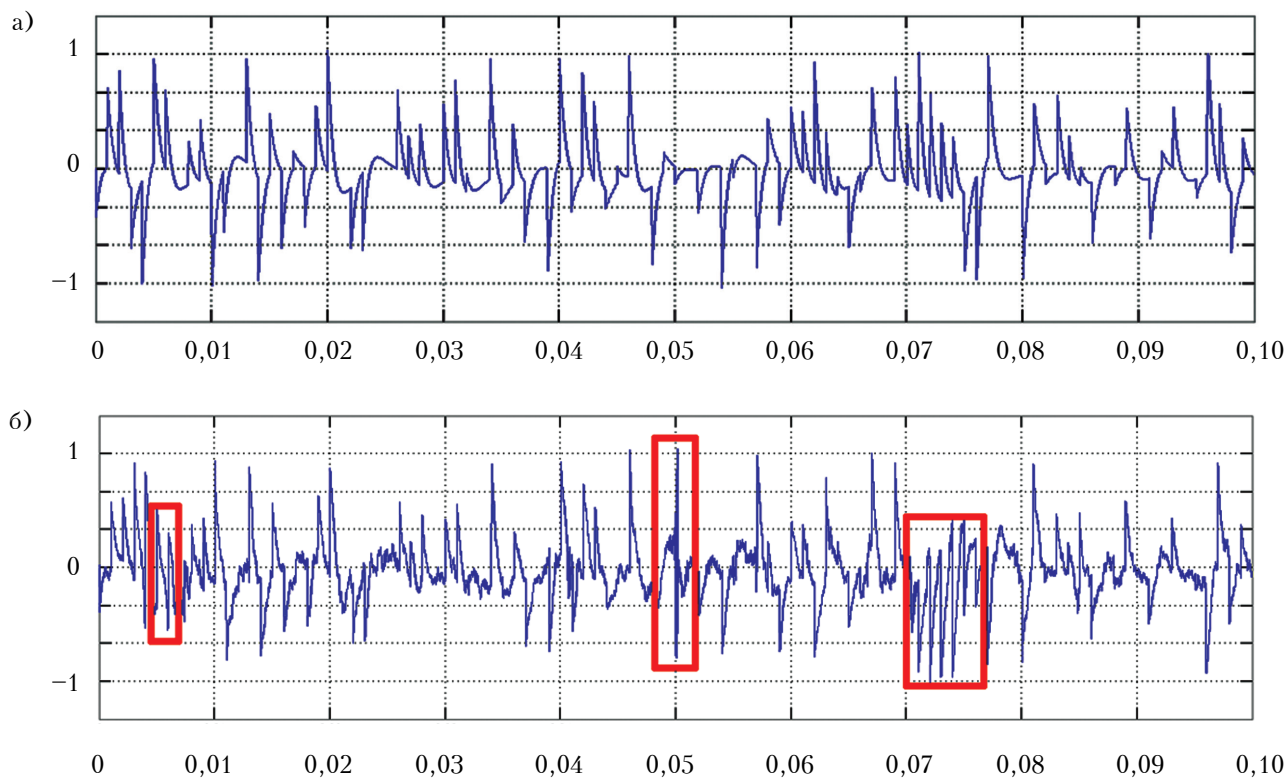


Рис. 6. Сигнал на виході детектора без впливу шуму (а) та сигнал за потужності шуму, яка призводить до порогового ефекту (б)  
(на б рамками виділені ділянки, де спостерігається пороговий ефект)

## Результати досліджень та їх обговорення

Дослідження було проведено за наступною методикою: змінюючи потужність адитивного шуму в каналі зв'язку при заданих параметрах фільтра петлі ФАПЧ, знаходили таке її значення, за якого у каналі зв'язку спостерігається пороговий ефект, тобто під час детектування відбувається зрив стеження за фазою сигналу. При цьому у деяких місцях було неможливо визначити значення фази через аномальні стрибки, а у інших величина фази сигналу набувала протилежного значення. Для цих випадків були проведені повторні дослідження за інших параметрів фільтра.

На рис. 6, а зображено часову діаграму сигналу на виході детектора без завади у каналі зв'язку, а на рис. 6, б — діаграму цього ж сигналу після проходження через канал зв'язку з потужною адитивною завадою, де у центрі видно зрив стеження за фазою сигналу, тобто появу порогового ефекту.

Шляхом ітерації параметрів фільтра петлі, а саме сталої часу  $T_f$  та коефіцієнта пропорційності  $m$ , було визначено граничну потужність шуму  $P_N$ , за якої настає пороговий ефект.

Оскільки шум у каналі є адитивним гаусовим шумом, на кожен біт інформаційного сигналу припадає потужність  $N_0 = 0,00001 P_N$ . Звідси було розраховано відношення сигнал/шум (SNR), за якого настав пороговий ефект у каналі зв'язку:  $SNR = 10 \lg(P_N/N_0)$ . Результати представлено у табл. 2. Тут видно, що найбільш стійкою до завад є конфігурація фільтра з параметрами  $T_f = 0,1$  с та  $m = 0,1$ .

Таблиця 2

Значення порогової потужності шуму та відношення сигнал/шум, отримані за різних значень параметрів фільтра петлі

$m$	$P_N$ (Вт) та SNR (дБ) за величини $T_f$ :			
	0,1 с	0,3 с	0,5 с	0,7 с
0,1	13,3 Вт; 8,76 дБ	13,2; 8,79	12,5; 9,03	12,9; 8,89
0,3	12,3 Вт; 9,1 дБ	12,6; 9,0	12,5; 9,03	12,6; 9,0
0,5	12,4 Вт; 9,07 дБ	12,4; 9,07	12,4; 9,07	12,4; 9,07
0,7	12,5 Вт; 9,03 дБ	12,3; 9,1	12,3; 9,1	12,3; 9,1

## Висновки

Проведені дослідження процесу детектування 8-QAM сигналів фазовим детектором, побудованим на базі ФАПЧ, за умови дії завади великої потужності в каналі зв'язку показали, що використання рекомендованих параметрів дозволяють досягнути виграша завадостійкості у порівнянні з класичним ФАПЧ більш ніж 1,3 дБ. Отримані параметри можна застосовувати як орієнтовні під час проектування реальних детекторів сигналів зі складною фазовою та амплітудно-фазовою модуляцією.

У подальших дослідженнях планується проаналізувати ефективність запропонованого методу щодо детектування сигналів з іншими складними видами амплітудно-фазової модуляції.

## ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Rajesh M. N., Shrishya B. K., Rao Nishith, Kumaraswamy H. V. An analysis of BER comparison of various digital modulation schemes used for adaptive modulation // Proc. of 2016 IEEE Int. Conf. on Recent trends in electronics, information & communication technology (RTEICT). — 2016. — P. 241–245. — <http://dx.doi.org/10.1109/RTEICT.2016.7807820>
2. Seimeni M. A., Gkonis P. K., Kaklamani D. I. et al. On BER evaluation of a Regional Anti-Jamming Subcarrier strategy for MIMO-OFDMA systems // Proc. of 9th European conf. on antennas and propagation (EuCAP). — 2015. — P. 1–5.
3. Best R. E. Phase-locked loops: Design, simulation, and applications. — New-York: McGraw-Hill Education, 2007.
4. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. — Москва: Сов. радио, 1977.
5. Пат. України на винахід № 66435. Пристрій фазового автопідстроювання частоти // А. П. Бондарев, М. С. Мартинів. — 2004. — Бюл. № 5.
6. Bondarev A., Maksymiv I., Maksymyuk T. Method of improving the power efficiency of QPSK signals // Proc. of 13th Int. conf. on modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. — Slavske, Ukraine. — 2016. — <http://dx.doi.org/10.1109/TCSET.2016.7452028>
7. Mathuranathan Viswanathan. Digital Modulations using MATLAB. Building Simulation Models from Scratch. — India, Pilani, 2017.
8. Бондарев А. П., Максимів І. П. Шляхи значного підвищення завадостійкості у системах коміркового зв'язку // Вісник НУ «ЛП», сер. «Радіоелектроніка та телекомунікації». — 2012. — С. 173–177.
9. Bondarev A., Maksymiv I. Method of improvement of quality indexes of detecting in cellular communication systems // Electronics and electrical engineering. — Kaunas, 2012. — N 10. — P. 85–88. — <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.18.10.3070>

Дата надходження рукопису  
в редакцію 19.09 2018 р.

И. П. МАКСЫМИВ, С. И. АЛТУНИН, А. П. БОНДАРЕВ, И. В. ГОРБАТЫЙ

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»

E-mail: ivan.p.maksymiv@lpnu.ua

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕКТОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИЕМА РАДИОСИГНАЛОВ СО СЛОЖНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Приведены результаты исследования влияния параметров детектора, реализованного на базе устройства фазовой автоподстройки частоты, на его эффективность. Проведено математическое модели-

рование сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией 8-QAM и исследовано влияние параметров устройства фазовой автоподстройки частоты на качество приема этих сигналов в условиях действия помехи в канале связи. Установлены наиболее приемлемые параметры, обеспечивающие максимальную помехоустойчивость системы связи, использующей сложные виды фазовой модуляции сигналов.

Ключевые слова: 8-QAM, фазовый детектор, ФАПЧ, помехоустойчивость.

DOI: 10.15222/TKEA2018.5-6.24  
UDC 621.372

I. P. MAKSYMIV, S. I. ALTUNIN,  
A. P. BONDARIEV, I. V. HORBATYI

Ukraine, Lviv Polytechnic National University  
E-mail: ivan.p.maksymiv@lpnu.ua

## THE INFLUENCE OF DETECTOR'S PARAMETERS ON THE EFFICIENCY OF RADIO SIGNALS WITH COMPLEX PHASE MODULATION RECEIVING

*The paper presents the results of simulation of a detector, implemented on the basis of a phase locked loop device (PLL), the mathematical modeling of signals with 8-QAM modulation, and investigates the influence of PLL parameters on the receiving quality of these signals with the interference in the communication channel. As a result of the study, the optimal parameters were found to provide the maximum noise-immunity for the communication system, which uses complex types of signals phase modulation.*

*Two methods of signal detector composition were considered and compared in terms of noise-immunity. The first one is classic detector based on PLL synchronization and the second one – modified detector with specific additional filters. Modified detector was chosen for maintaining the further experiments due to its potential higher noise-immunity.*

*The second part of the work was dedicated to the research of detection efficiency of modified detector using complex phase modulated signal 8-QAM. The simulation of this signal and the model adequacy check were carried out using Matlab software. The next step was the research of influence of filter parameters on the modified detector's noise-immunity during the 8-QAM signal detection.*

*The results of simulation show the optimum parameters at which the maximum noise-immunity of phase detector was achieved. These parameters may be useful for further researches or for the process of phase detector design.*

Keywords: 8-QAM, phase detector, PLL, noise immunity.

### REFERENCES

1. Rajesh M. N., Shrisha B. K., Rao Nishith, Kumaraswamy H. V. An analysis of BER comparison of various digital modulation schemes used for adaptive modulation. *Proc. of 2016 IEEE Int. Conf. on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 2016, pp. 241–245. <http://dx.doi.org/10.1109/RTEICT.2016.7807820>
2. Seimeni M. A., Gkonis P. K., Kaklamani D. I. et al. On BER evaluation of a Regional Anti-Jamming Subcarrier strategy for MIMO-OFDMA systems. *Proc. of 9<sup>th</sup> European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2015, pp. 1–5.
3. Best R. E. *Phase-Locked Loops: Design, Simulation and Applications*. New-York, McGraw-Hill Education, 2007.
4. Tikhonov V. I., Mironov M. A. *Markovskie protsessy* [Markov processes]. Moscow, Sov. radio, 1977. (Rus)
5. Bondariev A. P., Martyniv M. S. Patent 66435 UA. [Frequency phase auto-adjustment device]. 2004, bull. No. 5.
6. Bondarev A., Maksymiv I., Maksymyuk T. Method of improving the power efficiency of QPSK signals. *Proc. of 13<sup>th</sup> Int. Conf. on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Slavske, Ukraine, 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/TCSET.2016.7452028>
7. Mathuranathan Viswanathan. *Digital Modulations using MATLAB. Building Simulation Models from Scratch*. India, Pilani, 2017.
8. Bondariev A. P., Maksymiv I. P. [Ways of significant increase of noise immunity in cellular communication systems]. *Radio Electronics and Telecommunication*, Lviv Polytechnic National University, 2012, pp. 173–177. (Ukr)
9. Bondariev A., Maksymiv I. Method of improvement of quality indexes of detecting in cellular communication systems. *Electronics and Electrical Engineering*, Kaunas, 2012, no. 10, pp. 85–88. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.18.10.3070>

### Опис статті для цитування:

Максимів І. П., Алтунін С. І., Бондарєв А. П., Горбатий І. В. Вплив параметрів детектора на ефективність приймання радіосигналів зі складною фазовою модуляцією. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2018, № 5-6, с. 24–29. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.24>

### Cite the article as:

Maksymiv I. P., Altunin S. I., Bondariev A. P., Horbatiy I. V. The influence of detector's parameters on the efficiency of radio signals with complex phase modulation receiving. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 5-6, pp. 24–29. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.24>

К. т. н. В. Е. ТРОФИМОВ, к. т. н. А. Л. ПАВЛОВ, А. С. СТОРОЖУК

Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: vovic@ukr.net

## CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПАКТНО-СТРУЙНОГО РАДИАТОРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕРМОТРЕНИРОВКИ МИКРОПРОЦЕССОРОВ

*Методом CFD-моделирования получены тепло-аэродинамические характеристики импактно-струйного радиатора с воздушным охлаждением и тупиковыми полостями в форме расширяющихся и сужающихся конусов, а также комбинации конусов и цилиндров с дополнительным оребрением в виде прямых ребер. Проведен сравнительный анализ этих характеристик и характеристик радиатора с тупиковыми полостями только в форме цилиндра. Даны рекомендации по конструированию радиаторов предложенного типа для проведения термотренировки микропроцессоров.*

**Ключевые слова:** термотренировка, CFD-моделирование, радиатор, тепловое сопротивление, импактные струи, микропроцессор.

В настоящее время достаточно специфической и сложно реализуемой задачей, связанной с обеспечением заданного теплового режима микропроцессоров, является проведение их термотренировки. Процедура термотренировки является одним из обязательных видов испытаний при разработке электронных приборов данного типа и заключается в изучении поведения функциональных свойств микропроцессора в зависимости от изменения его температуры, в частности температуры корпуса [1].

Термотренировка проводится на специальном стенде, основным элементом которого является многослойная коммутационная печатная плата с установленными на ней сокетами с микропроцессорами, обеспечивающая разнообразные режимы функционирования микропроцессоров при выполнении ими специальных тестовых вычислений. Здесь же размещаются многочисленные датчики измерительных приборов или сами эти приборы для контроля электрических параметров в контрольных точках коммутационной платы в соответствии с методикой проведения термотренировки [1, 2].

Поддержание заданной температуры корпуса микропроцессора осуществляется, как правило, при помощи термоэлектрического модуля (ТЭМ). Его поверхность с регулируемой температурой находится в прямом механическом и тепловом контакте с пьедесталом корпуса микропроцессора, предназначенном для установки штатного кулера. Радиатор (теплообменник) ТЭМ отводит в окружающую среду суммарный

тепловой поток, выделяемый как микропроцессором, так и самим модулем [3].

В зависимости от программы термотренировки, сложности тестовых вычислений и типа микропроцессора используются разные конструкции и способы охлаждения радиаторов. Возможности их реализации существенно зависят от размеров свободного пространства на коммутационной плате стенда в зоне размещения микропроцессора. Высокий коэффициент заполнения платы, обеспечение свободного доступа к ее контрольным точкам и интерфейсам ограничивают это пространство габаритными размерами сокета с элементами крепления в плане не более 50×50 мм и требуют применения чрезвычайно компактного радиатора [2, 4].

Требование компактности становится особенно актуальным в случае воздушного охлаждения. Известные эффективные конструктивные решения, исследованные, например, в [5–8], содержат радиатор с проволочным или пластинчатым оребрением и осевой вентилятор, который, работая на нагнетание, направляет воздушный поток в межреберное пространство радиатора. Габаритные размеры таких и аналогичных им радиаторов исключают возможность их использования в ограниченном пространстве, характерном для термотренировочного стенда. В этом случае необходимы иные решения, одним из которых может быть уменьшение площади теплоотдающей поверхности радиатора за счет резкого увеличения ее коэффициента теплоотдачи. Резкий рост коэффициента теплоотдачи без увеличения расхода охлаждающего воздуха обе-



спечивает, например, использование импактных (ударных) струй, натекающих на охлаждаемую поверхность [9, 10]. Еще больший эффект позволяет получить разворот импактной струи, втекающей из сопла в тупиковую полость [11, 12].

В [13] проведено CFD-моделирование и показана возможность применения импактно-струйного радиатора с цилиндрическими тупиковыми полостями, форма и геометрические параметры которого допускают его размещение в ограниченном пространстве коммутационной платы стенда для термотренировки. На **рис. 1** представлена 3D-модель такого радиатора, установленного вместе с ТЭМ на корпусе микропро-

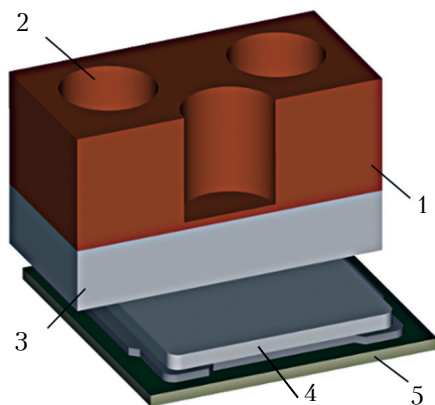


Рис. 1. 3D-модель радиатора в сборе с ТЭМ (симметричная половина) и микропроцессором:

1 – радиатор; 2 – цилиндрическая тупиковая полость; 3 – ТЭМ (показан схематично); 4 – микропроцессор; 5 – печатная плата микропроцессора

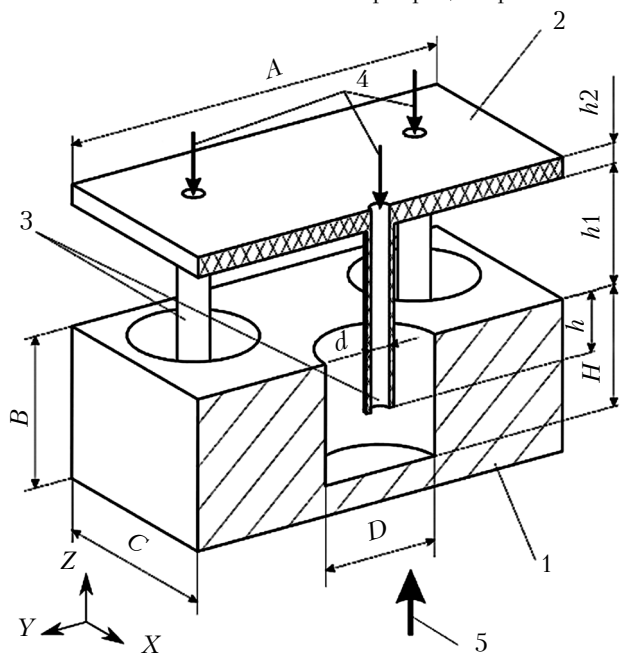


Рис. 2. Схематический чертеж соплодержателя и радиатора (симметричная половина):

1 – радиатор; 2 – соплодержатель; 3 – сопло; 4 – направление подвода воздуха; 5 – направление подвода теплового потока

цессора. На **рис. 2** показано взаимное расположение соплодержателя и тупиковых полостей радиатора, а также приведены основные параметры конструкции.

Все возрастающие успехи 3D-печати металлических изделий [14, 15] позволяют перейти к изготовлению более сложных форм тупиковых полостей радиатора, направленных на уменьшение его теплового сопротивления и затрат энергии на охлаждение, например в форме расширяющихся и сужающихся конусов, а также комбинации конусов и цилиндров с дополнительным оребрением. Однако в [13] и других известных работах исследование таких радиаторов не проводилось.

Настоящая работа посвящена оценке тепло-аэродинамических характеристик радиаторов с тупиковыми полостями конической и комбинированной формы.

### Объекты исследования

Объектами исследований были модели радиаторов с тупиковыми полостями различной формы (**рис. 3**), которые выбирались с целью улучшения таких характеристик, как потери давления воздуха и интенсивность теплоотдачи.

Как показано в [13], потери давления воздуха  $\Delta P$  в импактно-струйном радиаторе с цилиндрическими тупиковыми полостями на два порядка больше, чем в традиционных ребристых радиаторах, в которых движение воздушного потока происходит вдоль ребер. Одним из факторов,

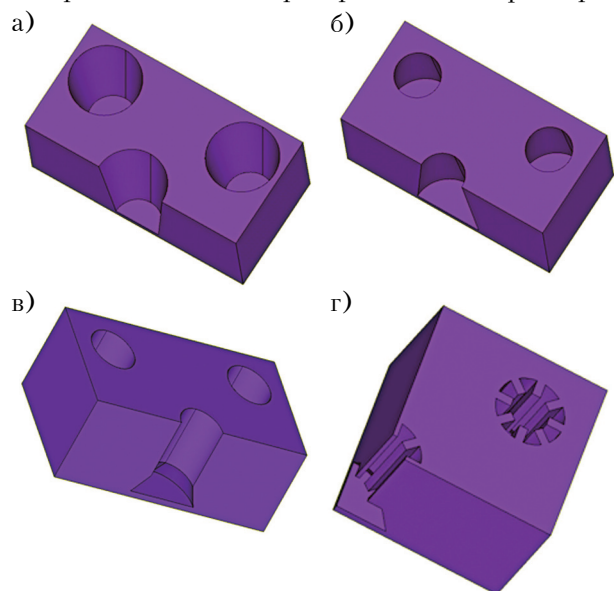


Рис. 3. 3D-модели радиаторов с тупиковыми полостями различной формы:

а – расширяющийся конус; б – сужающийся конус; в – комбинация конуса и цилиндра; г – комбинация конуса и цилиндра с оребрением цилиндрической части (а, б, в – симметричная половина; г – симметричная четверть)

влияющих на величину  $\Delta P$  импактно-струйного радиатора, является форма тупиковой полости [1, 12]. Уменьшить  $\Delta P$  позволяет, например, использование тупиковой полости в форме расширяющегося конуса (рис. 3, а). Для количественной оценки такого решения нами исследовался радиатор, в котором диаметр основания тупиковой полости был меньше, чем у представленного на рис. 1 и 2, а диаметр среза и глубина — такими же.

В [16] показано, что в цилиндрической тупиковой полости после удара и разворота струи воздушный поток теряет скорость, вследствие чего снижается интенсивность теплоотдачи на боковой поверхности полости. Компенсировать уменьшение скорости позволяет использование, например, тупиковой полости в форме сужающегося конуса (рис. 3, б). Нами был исследован радиатор, в котором диаметр среза тупиковой полости был меньше, чем у представленного на рис. 1 и 2, а диаметр основания и глубина — такими же.

Поскольку в радиаторе с полостями в форме сужающегося конуса потери давления воздуха могут быть выше, чем при цилиндрической форме, была также исследована комбинированная конструкция, тупиковая полость которой имеет коническую сужающуюся форму в зоне разворота потока и цилиндрическую форму на боковой поверхности (рис. 3, в). Высота конической и цилиндрической частей выбиралась в соответствии с [16], где показано, что в тупиковой полости основное падение скорости воздушного потока после разворота происходит на расстоянии от дна, равном приблизительно 0,3 его глубины.

Кроме этого, был исследован радиатор, в котором для компенсации уменьшения теплоотдачи цилиндрической поверхности тупиковой полости ее площадь была увеличена за счет размещения на ней прямых ребер (рис. 3, г).

Исследованные варианты конструкции радиатора имели следующие основные характеристики (см. рис. 2):

- размеры симметричной половины радиатора  $A \times B \times C = 40 \times 15 \times 20$  мм;
- глубина тупиковой полости  $H = 14$  мм;
- размеры тупиковых полостей:
  - расширяющийся конус: диаметр среза  $D = 12$  мм, диаметр основания 8 мм;
  - сужающийся конус: диаметр основания  $D = 12$  мм, диаметр среза 8 мм;
  - комбинированная: диаметр основания конической части  $D = 12$  мм, высота конической части 3,5 мм, диаметр цилиндрической части 8 мм, высота цилиндрической части 10,5 мм;
  - комбинированная с оребрением: 8 прямых ребер размерами  $1,0 \times 1,8 \times 10,5$  мм;

- зазор между соплодержателем и радиатором  $h_1 = 4$  мм;
- толщина основания соплодержателя  $h_2 = 2$  мм;
- внутренний диаметр сопла  $d = 3$  мм;
- толщина стенки сопла 0,5 мм;
- глубина погружения среза сопла в тупиковую полость  $h = 12$  мм;
- материал радиатора — медь;
- материал соплодержателя — пластик.

Внутренний диаметр сопла  $d$  и глубина погружения среза сопла в тупиковую полость  $h$  были выбраны в соответствии с рекомендациями, полученными в [13].

Для рассмотренных вариантов конструкции радиатора были определены зависимости их теплового сопротивления от скорости воздуха на входе в сопла и их аэродинамические характеристики (зависимость потерь давления воздуха  $\Delta P$  от его скорости на входе в сопла), а также проведен их сравнительный анализ с характеристиками радиатора с цилиндрическими тупиковыми полостями.

#### Математическая модель

Исследование проводилось в CAD/CAE-системе проектирования на платформе операционной системы CAELinux методом CFD-моделирования.

При проведении моделирования были приняты следующие допущения:

- в тупиковых полостях имеет место турбулентный режим течения с  $k$ — $\varepsilon$ -моделью турбулентности;
- вязкость, теплопроводность и плотность воздуха не зависят от температуры;
- режим течения воздушного потока стационарный;
- гравитационные силы пренебрежимо малы.

С учетом сделанных допущений математическая модель течения и сопряженного теплообмена в объектах исследования представлялась уравнениями неразрывности, энергии и Навье — Стокса в проекциях на координатные оси  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  при условии, что направление оси  $Z$  совпадает с направлением осей сопел, а направление оси  $X$  перпендикулярно плоскости симметрии (см. рис. 2):

- уравнение неразрывности

$$\frac{\partial V_x}{\partial X} + \frac{\partial V_y}{\partial Y} + \frac{\partial V_z}{\partial Z} = 0; \quad (1)$$

- уравнение энергии

$$V_x \frac{\partial T}{\partial X} + V_y \frac{\partial T}{\partial Y} + V_z \frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{k}{C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right); \quad (2)$$

— проекция уравнения Навье — Стокса на оси  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  соответственно:

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial X} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial Y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial Z^2} \right); \quad (3)$$

$$V_x \frac{\partial V_y}{\partial X} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial Y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial Z^2} \right); \quad (4)$$

$$V_x \frac{\partial V_z}{\partial X} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial Y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial Z^2} \right), \quad (5)$$

где  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  — проекции скорости воздуха на координатные оси;

$T$  — температура воздуха, радиатора или соплодержателя;

$k$ ,  $\rho$ ,  $C_p$  — соответственно, теплопроводность, плотность и теплоемкость объекта (воздуха, радиатора или соплодержателя);

$\mu$  — вязкость воздуха;

$P$  — давление воздушного потока.

Для уравнений (1) — (5) принимались следующие граничные условия:

— на всех поверхностях радиатора и соплодержателя, кроме лежащих в плоскости симметрии,  $V_x = V_y = V_z = 0$ ;

— в плоскости симметрии  $V_x = 0$ ;

— на поверхностях проточного объема, контактирующих с окружающей средой,  $P = 0$ ;

— скорость воздуха на входе в сопло  $V_0$  совпадает со скоростью  $V_z$  в этом сечении;

— на поверхностях радиатора и соплодержателя, не контактирующих с проточным объемом, имеют место адиабатные условия;

— температура воздуха на входе в сопло равна температуре окружающей среды  $T_0$ , принимаемой равной  $20^\circ\text{C}$ ;

— к основанию радиатора подводится тепловой поток  $Q = 75$  Вт;

Как и в [13], при выборе диапазона значений скорости истечения воздуха из сопел учитывалось ограничение на уровень акустических шумов для лабораторных помещений — не более 60 дБ. Исходя из этого, максимальная скорость воздуха  $V_0$  не превышала 100 м/с.

При использовании представленной математической модели, в объектах исследования определялись поля температур, а также скорости движения, давления и линий тока воздуха.

По результатам моделирования оценивалось тепловое сопротивление радиатора:

$$R = \frac{T_R - T_0}{Q}, \quad (6)$$

где  $T_R$  — максимальная температура радиатора.

#### Результаты моделирования и их анализ

Результаты моделирования характеристик исследуемых конструкций радиаторов, а также радиатора с цилиндрическими тупиковыми полостями, исследованного в [13], представлены в **таблице**. Анализ данных, приведенных в таблице, показывает следующее.

При скорости воздуха на входе в сопла 50 — 100 м/с тепловое сопротивление импактно-струйного радиатора всех рассмотренных конструкций изменяется в диапазоне от 0,5 до  $2,2^\circ\text{C}/\text{Вт}$ . Этого вполне достаточно для проведения термотренировки некоторых типов микропроцессоров с заданием ряда режимов их функционирования и выполнения некоторых видов тестовых вычислений [2].

По сравнению с радиаторами с цилиндрическими тупиковыми полостями:

— в радиаторах с коническими расширяющимися тупиковыми полостями незначительно, не более чем на 3%, уменьшаются потери давления воздуха, однако при этом на 35% возраста-

*Зависимость характеристик радиаторов с тупиковыми полостями различной формы от скорости воздуха на входе в сопла*

Форма полостей	$V_0$ , м/с	Характеристики радиатора		
		$T_R$ , $^\circ\text{C}$	$\Delta P$ , Па	$R$ , $^\circ\text{C}/\text{Вт}$
Цилиндрическая (рис. 1, 2) [13]	50	144,8	3466,0	1,66
	75	107,8	7847,0	1,17
	100	88,3	14007,0	0,91
Коническая расширяющаяся (рис. 3, а)	50	186,3	3357	2,22
	75	138,2	7602	1,58
	100	112,3	13573	1,23
Коническая сужающаяся (рис. 3, б)	50	135,8	3438	1,54
	75	100,9	7776	1,08
	100	82,6	13867	0,83
Комбинированная (рис. 3, в)	50	120,4	3266	1,34
	75	89,2	7376	0,92
	100	73,0	13144	0,70
Комбинированная с оребрением (рис. 3, г)	50	91,1	4271	0,95
	75	69,5	9465	0,66
	100	58,2	16677	0,51

ет тепловое сопротивление радиатора, т. е. данная конструкция имеет худшую теплопередачу;

— в радиаторах с коническими сужающимися тупиковыми полостями примерно на 10% уменьшается тепловое сопротивление, при этом изменение величины потерь давления воздуха не превышает 1%, т. е. данная конструкция позволяет интенсифицировать теплопередачу в радиаторе;

— в радиаторах с комбинированными тупиковыми полостями тепловое сопротивление уменьшается, несмотря на то, что площадь теплоотдающей поверхности в этом случае на 20% меньше. Уменьшение теплового сопротивления достигает 20%, при этом не более чем на 6% уменьшаются потери давления воздуха;

— в радиаторах с комбинированными тупиковыми полостями и оребрением уменьшается тепловое сопротивление. Это уменьшение достигает 44%, при этом потери давления воздуха возрастают на 20%, т. е. данная конструкция позволяет резко интенсифицировать теплопередачу в радиаторе, однако с побочным эффектом в виде роста потери давления воздуха.

Очевидно, что полученные характеристики могут быть улучшены при оптимизации геометрии тупиковых полостей. Целесообразно провести исследования влияния на тепловое сопротивление радиатора конусности сужающейся полости, ее диаметра и глубины погружения сопла; длины и диаметра цилиндрической части полости совместно с длиной и конусностью ее конической части; формы, размеров и количества ребер цилиндрической части комбинированной полости.

### Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что импактно-струйный радиатор с коническими расширяющимися тупиковыми полостями проигрывает по своим характеристикам всем остальным рассмотренным конструкциям. В то же время использование тупиковых полостей в форме сужающихся конусов, а также комбинации конуса и цилиндра с дополнительным оребрением может быть успешным решением для отвода теплоты от микропроцессоров при проведении такого вида испытаний, как их термотренировка. Вместе с тем, следует учитывать, что импактно-струйный радиатор обладает высоким аэродинамическим сопротивлением и требует для своей работы источника воздуха высокого давления.

В дальнейшем представляется целесообразным проведение исследований, направленных на оптимизацию рассмотренных конструкций радиаторов.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pooya Tadayon. Thermal challenges during microprocessor testing // Intel Technology Journal Q3, 2000. — P. 1–8. — [http://www.measure.jp/B/product/burn\\_in\\_func/20080607EADS-Burn-In-Intro/img/Intel-NextGenerationBurnInSystem.pdf](http://www.measure.jp/B/product/burn_in_func/20080607EADS-Burn-In-Intro/img/Intel-NextGenerationBurnInSystem.pdf) (05. 11. 2018)
2. Spokoyny M., Trofimov V. Collider jets cooling method of microprocessors // Proc. International Microelectronics and Packaging Society ATW on Thermal Management, Session 12 “Liquid, phase-change and refrigeration cooling”. — Palo Alto, CA, USA. — 2011. — P. 1–18.
3. Khaled Teffah, Youtong Zhang, Xiao-long Mou. Modeling and experimentation of new thermoelectric cooler-thermoelectric generator module // Energies. — 2018. — Vol. 11, N 576. — 11 p. — <http://dx.doi.org/10.3390/en11030576>
4. Spokoyny M., Trofimov V., Qiu X., Kerner J. M. Enhanced heat transfer in a channel with combined structure of pins and dimples // Proc. 9th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. — San Francisco, CA. — 2006. — P. 1–21.
5. Ayla Dogan, Oguzhan Ozbalci. Experimental investigation of the effect of metal foam material on CPU cooling // Journal of Engineering Technology and Applied Sciences. — 2017. — Vol. 2, N 3. — P. 113–120.
6. Булавин Л. А., Актан О. Ю., Николаенко Т. Ю., Николаенко Ю. Е. Экспериментальное исследование температурного поля радиатора кулера // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 5. — С. 61–64.
7. Письменный Е. Н., Рогачев В. А., Баранюк А. В., Цвященко Я. В. Теплоотводящая поверхность с пластинчатопросечным оребрением при низкоскоростном обдуве // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2005. — № 4. — С. 43–45.
8. Рассемакин Б. М., Рогачев В. А., Хайрмасов С. М. Кулеры на тепловых трубах для теплонагруженных компонентов персональных компьютеров // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 4. — С. 48–50.
9. Юдаев В. Н., Михайлов М. С., Савин В. К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. — Москва: Машиностроение, 1977.
10. Luhar S., Sarkar D., Jain A. Steady state and transient analytical modeling of non-uniform convective cooling of a microprocessor chip due to jet impingement // International Journal of Heat and Mass Transfer. — July 2017. — Vol. 110. — P. 768–777. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.064>
11. Спокойный Ю. Е., Трофимов В. Е., Олибаш Г. В. Выбор конструктивных параметров радиаторов для струйного импактного охлаждения БИС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1998. — № 1. — С. 18–19.
12. Спокойный Ю. Е., Трофимов В. Е., Олибаш Г. В. Проектирование радиаторов для ИС со струйным импактным воздушным охлаждением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1998. — № 2. — С. 17–19.
13. Трофимов В. Е., Павлов А. Л., Мокроусова Е. А. CFD-моделирование радиатора для воздушного охлаждения микропроцессоров в ограниченном пространстве // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2016. — № 6. — С. 30–35. — <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2016.6.30>
14. Thomas Duda. L., Venkat Raghavan. 3D metal printing technology // IFAC-PapersOnLine. — 2016. —



Vol. 49, iss. 29. — P. 103–110. — <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.111>

15. Anton du Plessis, Stephan Gerhard le Roux, Francis Steyn. Quality investigation of 3D printer filament using laboratory X-ray tomography // 3D Printing and Additive Manufacturing. — 2016. — Vol. 3, N 4. — P. 1–6. — <https://doi.org/10.1089/3dp.2016.0011>

16. Трофимов В. Е., Павлов А. Л. Моделирование радиаторов со струйным воздушным охлаждением // Тр. 11-й МНПК «СИЭТ-2010». Т. II. — Украина, г. Одесса. — 2010. — С. 22.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 14.11 2018 г.

В. Е. ТРОФИМОВ, О. Л. ПАВЛОВ, О. С. СТОРОЖУК

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: vovic@ukr.net

## CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ІМПАКТНО-СТРУМЕНЕВОГО РАДІАТОРА ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ТЕРМОТРЕНУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРІВ

Одним з завершальних етапів розробки мікропроцесорів є термотренування. Ця процедура виконується на спеціальному стенді, основним елементом якого є комунікаційна друкована плата із встановленими сокетомі мікропроцесорів, чіпсетами, інтерфейсами, перемичками та іншими компонентами, які забезпечують різні режими роботи мікропроцесора.

Зміна температури корпусу мікропроцесора здійснюється зазвичай за допомогою термоелектричного модуля. Холодна поверхня модуля з контрольованою температурою знаходиться в прямому тепловому контакті з н'єдсталом корпусу мікропроцесора, призначеним для встановлення кулерів. На гарячій поверхні модуля встановлюється радіатор для розсіювання загального теплового потоку від мікропроцесора та модуля.

Високий коефіцієнт заповнення комутаційної плати для термотренування, вимога вільного доступу до перемичок, інтерфейсів та наявність численних датчиків обмежують простір для монтажу кулера та вимагають використання надзвичайно компактного радіатора, особливо в умовах повітряного охолодження. Одним з варіантів вирішення цієї задачі може бути зменшення площі поверхонь теплообміну радіатора через різке зростання на них коефіцієнта тепловіддачі без збільшення витрати повітря. Різкого зростання коефіцієнта теплопередачі радіатора можна досягти, якщо виконати у поверхнях теплообміну декілька конічних або комбінованих конічно-циліндричних глухих порожнин з додатковим оребрением, до яких потрапляють ударні струмені повітря.

В роботі проведено CFD-моделювання радіаторів такого типу. Визначено, що в діапазоні зміни швидкості повітря на вході в сопла 50–100 м/с досліджені конструкції імпаکتно-струменевого радіатора мають тепловий опір в діапазоні 0,5–2,2°C/Вт. Цього цілком достатньо для проведення термотренування деяких типів мікропроцесорів із завданням ряду режимів їх функціонування і виконання деяких видів тестових обчислень. Показано, що використання комбінованих глухих порожнин з додатковим оребрением є найкращим з розглянутих рішень і дозволяє різко (до 44%) інтенсифікувати теплопередачу в радіаторі в порівнянні з циліндричними глухими порожнинами, проте з побічним ефектом — зростанням до 20% втрати тиску повітря.

В результаті проведеного дослідження встановлено, що імпаکتно-струменевий радіатор з глухими порожнинами в формі конуса, що звужується, а також комбінації конуса і циліндра з додатковим оребрением може бути успішним рішенням для відводу теплоти від мікропроцесорів при проведенні такого виду їх випробувань, як термотренування. Разом з тим, слід враховувати, що радіатор зазначеного типу має високий аеродинамічний опір і вимагає для своєї роботи джерела повітря високого тиску.

Ключові слова: CFD-моделювання, радіатор, тепловий опір, імпактні струмені, мікропроцесори.

DOI: 10.15222/TKEA2018.5-6.30  
UDC 536.24

V. E. TROFIMOV, A. L. PAVLOV, A. S. STOROZHUK

Ukraine, Odessa National Polytechnic University

E-mail: vovic@ukr.net

## CFD-SIMULATION OF IMPACT JET RADIATOR FOR THERMAL TESTING OF MICROPROCESSORS

One of the final stages of microprocessor development is thermal testing. This procedure is performed on a special stand, the main element of which is a switching PCB with mounted microprocessor sockets, chipsets, interfaces, jumpers and other components which provide various modes of microprocessor operation.

Changing the case temperature of the microprocessor is carried out typically using a thermoelectric module. The cold surface of the module with controlled temperature is in direct thermal contact with the microprocessor housing designed for cooler installation. On the hot surface of the module, the radiator is mounted which

dissipates the total heat flux from the microprocessor and the module.

High density PCB layout, the requirement of free access to the jumpers and interfaces, and the presence of numerous sensors restrict the space for radiator mounting and require the use of an extremely compact radiator, especially in air cooling conditions. One of possible solutions for this problem may be to reduce the area of the heat-transfer surfaces of the radiator due to a sharp growth of the heat transfer coefficient without increasing the air flow rate. A sharp growth of heat transfer coefficient of the radiator can be achieved by making several conic or combined conic-cylindrical dead-end cavities with extra finning in the heat-transfer surface. Such cavities should absorb the impact air jets.

In this study, CFD simulation of such radiators has been conducted. It is determined that when the air velocity at the nozzle entrances is 50–100 m/s, the investigated designs of impact-jet radiators have a thermal resistance in the range of 0.5–2.2°C/W. This is quite sufficient for the thermal testing of some types of microprocessors with setting a number of operational modes and performing of certain types of test computations. It is shown that the use of combined dead-end cavities with extra finning is the best of the considered solutions and allows for a sharp (up to 44%) intensification of heat transfer in the radiator in comparison with cylindrical dead-end cavities, but at a cost – the loss of air pressure increases up to 20%.

As a result of the study, it was found that the impact-jet radiator with dead-end tapering cone shaped cavities and combined cone-cylinder shaped cavities with extra finning, can successfully solve the problem of heat removal from microprocessors during thermal testing. However, it should be noted, that such radiators have a high aerodynamic resistance and require a high pressure air source for operation.

**Keywords:** CFD-simulation, radiator, thermal resistance, impact jets, microprocessor chips.

## REFERENCES

1. Pooya Tadayon. Thermal challenges during microprocessor testing. *Intel Technology Journal Q3, 2000*, pp. 1–8. [http://www.measure.jp/B/product/burn\\_in\\_func/20080607EADS-Burn-In-Intro/img/Intel-NextGenerationBurnInSystem.pdf](http://www.measure.jp/B/product/burn_in_func/20080607EADS-Burn-In-Intro/img/Intel-NextGenerationBurnInSystem.pdf) (05.11.2018)
2. Spokoyny M., Trofimov V. Collider jets cooling method of microprocessors. Proc. 2011 *International Microelectronics and Packaging Society ATW on Thermal Management*, Session 12 “Liquid, phase-change and refrigeration cooling”. Palo Alto, CA, USA, 2011, pp. 1–18.
3. Khaled Teffah, Youtong Zhang, Xiao-long Mou. Modeling and experimentation of new thermoelectric cooler–thermoelectric generator module. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 576, pp. 1–11. <http://dx.doi.org/10.3390/en11030576>
4. Spokoyny M., Trofimov V., Qiu X., Kerner J.M. Enhanced heat transfer in a channel with combined structure of pins and dimples. *Proc. 9th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*, San Francisco, CA, 2006, pp. 1–21.
5. Ayla Dogan, Oguzhan Ozbilci. Experimental investigation of the effect of metal foam material on CPU cooling. *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences*, 2017, vol. 2, no. 3, pp. 113–120.
6. Bulavin L.A., Aktan O.Yu., Nikolaienko T.Yu., Nikolaienko Yu.E. Experimental examination of a temperature field of a heat sink cooler. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2006, no. 5, pp. 61–64. (Rus)
7. Pismenniy E. N., Rogachev V. A., Baranjuk A. V., Tsvyachenko E. V. Thermal efficiency of with plate-cut fins in conditions low speed to blow. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2005, no. 4, pp. 43–45. (Rus)
8. Rassamakin B. M., Rogachev V. A., Khayrnasov S. M. Coolers based on heat pipes for thermally loaded devices of personal computers. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2006, no. 4, pp. 48–50. (Rus)
9. Yudaev V.N., Mikhailov M.S., Savin V.K. Heat transfer when jets interact with barriers. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 247 p. (Rus)
10. Luhar S., Sarkar D., Jain A. Steady state and transient analytical modeling of non-uniform convective cooling of a microprocessor chip due to jet impingement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 110, pp. 768–777. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.064>
11. Spokoyny Yu.Ye., Trofimov V.E., Olibash G.V. Choosing design parameters for radiators for jet impact cooling of large integrated circuits. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 1998, no. 1, pp. 18–19. (Rus)
12. Spokoyny Yu.Ye., Trofimov V.E., Olibash G.V. Designing jet air cooled radiators for IS. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 1998, no. 2, pp. 17–19. (Rus)
13. Trofimov V.E., Pavlov A.L., Mokrousova E.A. CFD-simulation of radiator for air cooling of microprocessors in a limited space. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*. 2016, no. 6, pp. 30–35. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2016.6.30> (Rus)
14. Thomas Duda.L., Venkat Raghavan. 3D metal printing technology. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, iss. 29, pp. 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.111>
15. Anton du Plessis, Stephan Gerhard le Roux, Francis Steyn. Quality investigation of 3D printer filament using laboratory X-ray tomography. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2016, vol. 3, no. 4, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1089/3dp.2016.0011>
16. Trofimov V.E., Pavlov A.L. Jet air cooled radiator. *Proc. 11th Int. sc.-pract. conf. «Modern Information and Electronic Technologies»*, vol. II, Ukraine, Odesa, 2010, p. 22. (Rus)

## Описание статьи для цитирования:

Трофимов В. Е., Павлов А. Л., Сторожук А. С. CFD-моделирование импактно-струйного радиатора для проведения термотренировки микропроцессоров. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 5-6, с. 30–36. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.30>

## Cite the article as:

Trofimov V. E., Pavlov A. L., Storozhuk A. S. CFD-simulation of impact jet radiator for thermal testing of microprocessors. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 5-6, pp. 30-36. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.30>

К. ф.-м. н. Т. Т. КОВАЛЮК, к. ф.-м. н. Э. В. МАЙСТРУК, к. т. н. М. Н. СОЛОВАН,  
к. ф.-м. н. И. П. КОЗЯРСКИЙ, д. ф.-м. н. П. Д. МАРЬЯНЧУК

Украина, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

E-mail: t.kovalyuk@chnu.edu.ua

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ И ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ НА ИХ ОСНОВЕ

*Представлены результаты исследований кинетических свойств кристаллов  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ . Также исследованы электрические свойства и установлены доминирующие механизмы токопереноса при прямых и обратных смещениях анизотипных гетеропереходов  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , изготовленных методом магнетронного осаждения тонких пленок  $\text{TiO}_2$  на подложки из кристаллов  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ .*

*Ключевые слова:* кристаллы  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , кинетические свойства,  $\text{TiO}_2$ , гетеропереход, тонкая пленка, электрические свойства, механизмы токопереноса.

Наиболее перспективными материалами для создания преобразователей солнечного излучения считаются такие соединения, как  $\text{CdTe}$  и твердые растворы  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ ,  $\text{CuIn}(\text{S}, \text{Se})_2$ ,  $\text{CuGa}(\text{S}, \text{Se})_2$ . КПД фотопреобразователей при использовании  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  равен примерно 21,7% [1] в лабораторных условиях и 15,7% для готовых модулей солнечных элементов в промышленном масштабе. Однако неэкологичность  $\text{Cd}$ ,  $\text{Te}$  и ограниченность земных запасов  $\text{In}$ ,  $\text{Ga}$ , а также их высокая стоимость заставляют исследователей заменять  $\text{In}$  и  $\text{Ga}$  на более распространенные элементы II и IV групп, а именно  $\text{Zn}$  и  $\text{Sn}$ . Кроме этого, проводятся исследования новых полупроводниковых соединений, таких как  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ,  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , а также твердых растворов на их основе [2–7]. Эти соединения обладают близкой к оптимальной для преобразования солнечной энергии шириной запрещенной зоны ( $E_g \approx 1,5$  эВ), высоким коэффициентом поглощения света ( $\approx 10^5 \text{ см}^{-1}$ ), большим временем жизни носителей заряда, а также достаточно высокой их подвижностью.

В различных тонкопленочных фотоэлектрических устройствах широко используются тонкие пленки  $\text{TiO}_2$  благодаря высокому коэффициенту пропускания света в видимом диапазоне, большому значению показателя преломления, широкому диапазону значений удельного электрического сопротивления, стабильности параметров во времени [8]. Диоксид титана широко применяется в солнечных элементах в качестве просветляющего покрытия, фронтального проводящего контакта, диэлектрического слоя, материала для формирования гетеропереходов [5, 9–10].

Также в настоящее время неуклонно растет интерес к полупроводниковым гетеропереходам, обладающим рядом преимуществ по сравнению с гомопереходами, они активно используются в электронике, лазерах, фотовольтаике [8, 9]. Это привело к публикации нескольких работ по изготовлению и исследованию свойств гетеропереходов  $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  [11–13]. Данные исследования направлены на улучшение фотоэлектрических свойств этих структур, но в них очень мало внимания уделено изучению электрических свойств и доминирующих механизмов токопереноса, которые позволяют лучше понять происходящие на металлургической границе раздела физические процессы, а в будущем улучшить параметры таких структур.

Целью настоящей работы является исследование кинетических свойств кристаллов  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , а также создание анизотипных гетеропереходов  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  и определение их электрических параметров.

### Экспериментальные образцы и методика проведения исследований

Кристаллы  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  (CZTSe) были получены методом Бриджмена. В качестве исходных веществ для синтеза и выращивания кристаллов использовали вакуумплавленную медь, высокочистое олово (ОВЧ-000), цинк высокой чистоты (7N), селен элементарный (ОСЧ 22-4). Температуру синтеза и выращивания кристаллов подбирали экспериментально, пользуясь диаграммами состояния компонентов, входящих в состав соединения.

Ампулы имели вытянутый конусообразный конец и изготавливались из толстостенно-

го кварца. Для того чтобы предотвратить взаимодействие загружаемого материала с кварцем, ампулы графитизировали и повторно сушили в вакуумном шкафу, оставляя их там до загрузки шихты.

Структурные свойства кристаллов исследовали методом микроРамановской спектроскопии (T64000 Horiba Jobin Yvon). Для возбуждения спектров комбинационного рассеяния использовалось излучение  $\text{Ar}^+$ -лазера с длиной волны  $\lambda = 514,5$  нм. Чтобы избежать влияния на структуру кристаллов во время измерений, мощность лазерного излучения была выбрана минимально возможной (его плотность составляла  $0,1 \text{ мВт/мм}^2$ ).

Для изготовления гетеропереходов использовали кристаллы  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$   $p$ -типа проводимости, подвергнутые предварительной механической обработке (шлифовка, полировка). Установлено, что концентрация носителей заряда при температуре 295 К составляла  $p = 4,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Гетеропереходы изготавливали путем нанесения пленок  $\text{TiO}_2$  на поверхность кристаллов  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  (типоразмер  $7 \times 7 \times 1$  мм) в универсальной вакуумной установке Leybold Heraeus L560, которая предварительно откачивалась до остаточного давления  $5 \cdot 10^{-3}$  Па. Нанесение проводилось реактивным магнетронным распылением мишени чистого титана в атмосфере смеси аргона и кислорода при постоянном напряжении. Подложки размещались над магнетроном на вращающемся столике, предназначенном для обеспечения однородности пленок по толщине.

Газовая смесь в необходимой пропорции формировалась из двух независимых источников в течение процесса напыления. Для удаления неконтролируемого загрязнения поверхности мишени и подложек использовали кратковременное протравливание бомбардирующими ионами аргона.

В течение процесса напыления парциальное давление в вакуумной камере составляло 0,7 Па для аргона и 0,02 Па для кислорода, мощность магнетрона 300 Вт, продолжительность процесса напыления 20 мин, температура подложек 300 К.

Фронтальный электрический контакт с тонкой пленкой  $\text{TiO}_2$  формировали методом термического осаждения индия при температуре подложки  $150^\circ\text{C}$ . В качестве материала для создания омического контакта был выбран молибден, поскольку он обеспечивает достаточную стабильность свойств при высокой температуре и чаще всего применяется как тыловой контакт в конструкциях солнечных элементов на основе  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  [14], его наносили с помощью реактивного магнетронного распыления.

Размеры экспериментальных образцов составляли примерно  $8,0 \times 2,0 \times 1,5$  мм. Исследования кинетических коэффициентов проводили при различных значениях температуры ( $T = 290 - 340$  К) и напряженности магнитного поля ( $H = 40 - 400$  кА/м). Суммарная погрешность при определении электропроводности составляла около 2%, коэффициента Холла 6%, при измерении коэффициента термо-эдс она не превышала 6%.

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) гетероструктур проводилось по стандартной методике с использованием источника постоянного тока BVP Electronics, в качестве амперметра использовался точный мультиметр Fluke 5545A, а в качестве вольтметра — Picotest M3500A.

### Кинетические свойства кристаллов $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$

На рис. 1 представлены результаты исследования спектров комбинационного рассеяния кристаллов  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , полученные при комнатной температуре. Спектры регистрировались в разных частях образца, которые затем усреднялись для получения средних параметров материала, а также для определения характера составляющих его кристаллических фаз.

Установлено, что образцы  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  — поликристаллические. На рамановских спектрах (см. вставку на рис. 1) присутствуют характерные для фазы кестерита пики при 173 и 192  $\text{см}^{-1}$ , а также для примеси вторичных фаз — при 180 и 236  $\text{см}^{-1}$ , что соответствует соединению  $\text{Cu}_2\text{SnSe}_3$ , и при 253  $\text{см}^{-1}$ , что соответствует  $\text{ZnSe}$  [15, 16].

Характер полученных температурных зависимостей электропроводности  $\sigma$  кристаллов  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  (рис. 2) — металлический ( $\sigma$  уменьшается с ростом  $T$ ), что обусловлено уменьше-

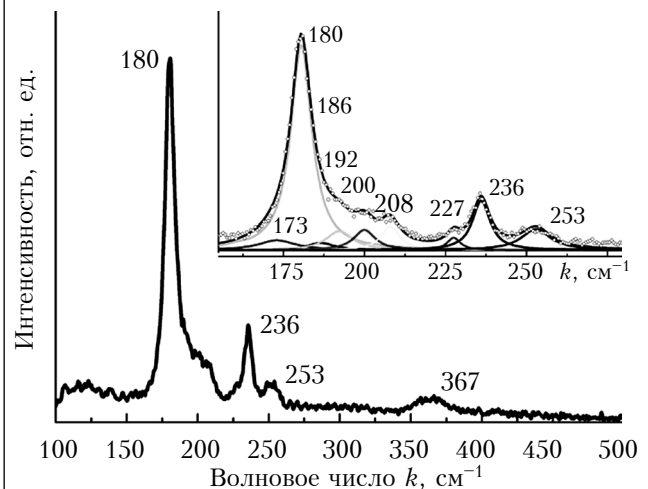


Рис. 1. Рамановские спектры кристаллов  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$



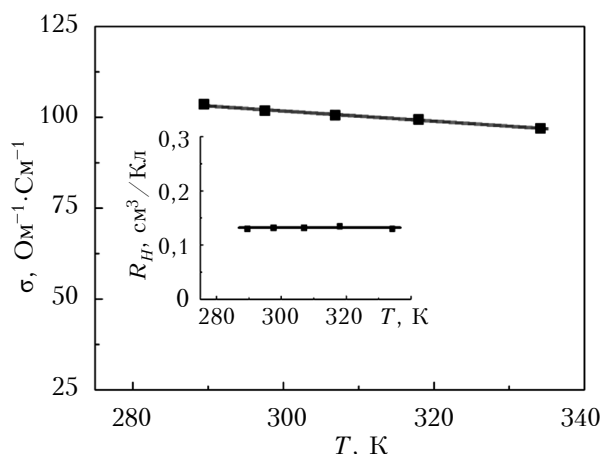


Рис. 2. Температурные зависимости удельной электропроводности и коэффициента Холла (на вставке) кристаллов  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$

нием подвижности носителей заряда при росте температуры.

Коэффициент Холла  $R_H$  исследуемых кристаллов не зависит от температуры (см. вставку на рис. 2), что указывает на вырожденность газа носителей заряда в полупроводнике. Коэффициент термо-эдс для всех образцов положительный, что также указывает на преобладание  $p$ -типа проводимости.

#### Электрические свойства и механизмы токопереноса в гетероструктурах $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$

Энергетическая диаграмма исследуемых анизотипных гетероструктур  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  в соответствии с моделью Андерсона [17], без учета поверхностных электрических состояний и диэлектрического слоя, была построена на основе энергетических параметров полупроводников, взятых из литературных источников [18–20] (рис. 3). Значения энергии уровня Ферми  $E_F$  относительно зоны проводимости в  $n\text{-TiO}_2$  и относительно валентной зоны в  $p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  были определены с учетом экспериментально полученных значений концентрации носителей заряда в  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  соответственно.

Для расчета толщины обедненных областей в  $\text{TiO}_2$  ( $d_n$ ) и  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  ( $d_p$ ) можно использовать следующие выражения [9]:

$$d_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 N_A \varepsilon_n \varepsilon_p \Phi_0}{q N_D (\varepsilon_n N_D + \varepsilon_p N_A)}};$$

$$d_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 N_D \varepsilon_n \varepsilon_p \Phi_0}{q N_A (\varepsilon_n N_D + \varepsilon_p N_A)}};$$

где  $q$  — заряд электрона;

$\varepsilon_0$  — электрическая постоянная ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);

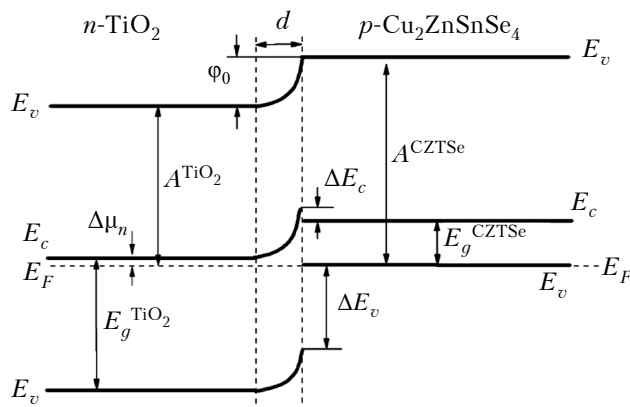


Рис. 3. Энергетическая диаграмма гетероструктуры  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ :

$E_F$  — уровень Ферми;  $E_g$  — ширина запрещенной зоны;  $E_v$  — уровень вакуума;  $E_c$  — край зоны проводимости;  $E_v$  — край валентной зоны;  $A$  — работа выхода;  $\Phi_0$  — высота потенциального барьера;  $d$  — область пространственного заряда

$$\begin{aligned} E_g^{\text{TiO}_2} &= 3,15 \text{ эВ}; \Delta\mu_n = 0,103 \text{ эВ}; A^{\text{TiO}_2} = 4,4 \text{ эВ}; \\ E_g^{\text{CZTSe}} &= 1 \text{ эВ}; A^{\text{CZTSe}} = 5,61 \text{ эВ}; \Delta E_c = 0,3 \text{ эВ}; \\ \Delta E_v &= 1,84 \text{ эВ}; \Phi_0 = 1,21 \text{ эВ} \end{aligned}$$

$\varepsilon_n, N_D$  — относительная диэлектрическая проницаемость и концентрация доноров в  $\text{TiO}_2$ ;

$\varepsilon_p, N_A$  — относительная диэлектрическая проницаемость и концентрация акцепторов в  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ .

Полученные значения составляют:

$$d_n = 0,841 \cdot 10^{-7} \text{ м}, d_p = 0,858 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

Поскольку  $d_n \gg d_p$ , можно считать, что область пространственного заряда гетероструктуры  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  формируется в  $\text{TiO}_2$  ( $d = d_n$ ).

На рис. 4 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетероперехода  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , измеренные при различной темпе-

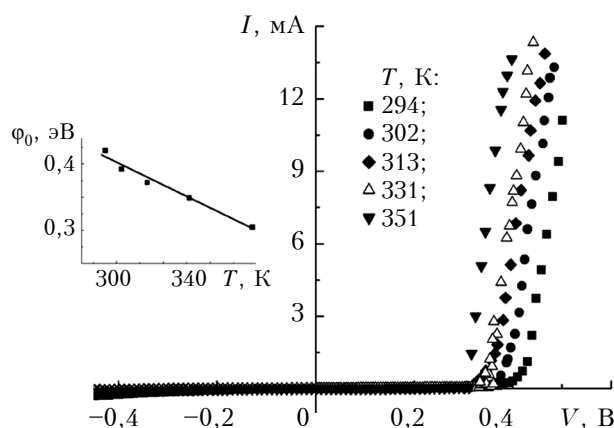


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики, полученные при различной температуре, и температурная зависимость высоты потенциального барьера (на вставке) гетеропереходов  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$

ратуре. Путем экстраполяции линейных участков ВАХ до пересечения с осью напряжения определены значения высоты потенциального барьера гетероперехода ( $\phi_0 = qV_{bi}$ , где  $V_{bi}$  — контактная разность потенциалов) при различных температурах (см. вставку на рис. 4). Расхождение между значениями высоты потенциального барьера, полученными экспериментально и путем расчета на основе модели Андерсона, обусловлено большой концентрацией поверхностных состояний — это приводит к формированию электрического диполя на границе раздела, который уменьшает  $\phi_0$  исследованного гетероперехода.

Установлено, что температурная зависимость высоты потенциального барьера гетероструктуры  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  хорошо описывается уравнением

$$\phi_0(T) = \phi_0(0) - \beta_\phi T, \quad (1)$$

где  $\beta_\phi$  — температурный коэффициент,  
 $\beta_\phi = 1,71 \cdot 10^{-3}$  эВ/К;

$\phi_0(0)$  — значение  $\phi_0$  исследуемой гетероструктуры при абсолютном нуле температуры,  
 $\phi_0(0) = 0,91$  эВ.

Величину последовательного сопротивления гетероструктуры  $R_s$  можно определить из наклона прямой ветви ВАХ. Из рис. 4 видно, что когда напряжение становится больше высоты потенциального барьера, ВАХ переходят из экспоненциальной зависимости в линейную. Это свидетельствует о том, что напряжение в барьерной области гетероперехода перестает изменяться, т. е. барьер практически открыт, а ток через гетеропереход ограничивается его последовательным сопротивлением  $R_s$ .

На рис. 5 представлена зависимость дифференциального сопротивления  $R_{dif}$  гетероперехода от напряжения, откуда можно определить значения последовательного ( $R_s = 8$  Ом) и шунтирующего ( $R_{sh} = 5,8$  кОм) сопротивлений при комнатной температуре.

На рис. 6 представлены прямые ветви ВАХ гетероперехода (в полулогарифмических координатах для удобства анализа доминирующих механизмов токопереноса при прямом смещении), измеренные при различной температуре. Определенные по начальным линейным участкам ВАХ ( $3kT/e < V < 0,3$  В) значения показателя неидеальности  $n$  практически не меняются с ростом температуры ( $n \approx 5$ ), что свидетельствует о туннельно-рекомбинационном механизме токопереноса [21].

При величине прямого смещения  $V > 0,3$  В коэффициент неидеальности близок к единице, что указывает на то, что прямой ток в этой области значений  $V$  формируется надбарьерной эмис-

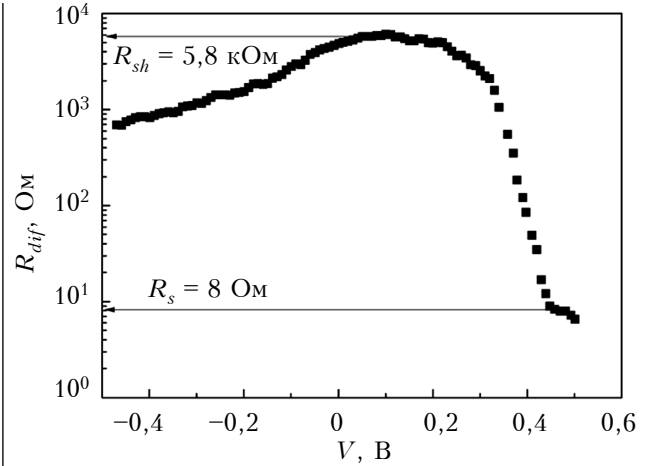


Рис. 5. Зависимость дифференциального сопротивления гетероперехода  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  от напряжения при  $T = 294$  К

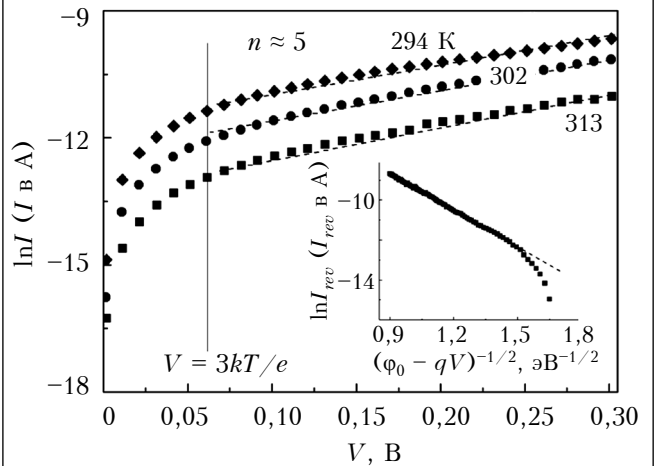


Рис. 6. Прямые ветви вольт-амперной характеристики, полученные при различной температуре, и обратная ветвь при  $T = 294$  К (на вставке) гетероперехода  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$

сией. Увеличение  $V$  приводит к уменьшению потенциального барьера, в результате чего может появиться надбарьерный ток. В области напряжений  $0,30 < V < 0,45$  В зависимости  $I(V)$  хорошо описываются выражением, полученным согласно модели Андерсона для эмиссионного механизма токопереноса [17]. Отличие показателя неидеальности от единицы обусловлено влиянием поверхностных состояний. Таким образом, доминирующим механизмом токопереноса при прямом смещении  $V > 0,3$  В является надбарьерная эмиссия.

Обратный ток через исследуемый гетеропереход в области смещений  $V > 3kT/e$  описывается соотношением  $I_{rev} \sim \exp[(\phi_0 - qV)^{-1/2}]$  (см. вставку на рис. 6), что свидетельствует о доминировании туннельного механизма токопереноса при приложении внешнего напряжения в обратном направлении.

## Выводы

Проведенные исследования показали, что кристаллы  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  обладают  $p$ -типом проводимости, их коэффициент Холла не зависит от температуры, а электропроводность уменьшается с ростом температуры. Также установлено, что при напряжении до 0,3 В доминирующими механизмами токопереноса в гетеропереходах  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , изготовленных методом магнетронного осаждения тонких пленок  $\text{TiO}_2$  на подложки из кристаллов  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , является туннельно-рекомбинационный механизм, при смещении от 0,3 до 0,45 В — надбарьерная эмиссия и туннелирование при обратном смещении.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Green M.A., Hishikawa Y., Warta W. et al. Solar cell efficiency tables (version 50) // Progress in Photovoltaics. — 2017. — P. 668 — 676. — <http://dx.doi.org/10.1002/pip.2909>
2. Wang W., Winkler M.T., Gunawan O. et al. Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency // Advanced Energy Materials. — 2014. — Vol. 4. — P. 1–5. — <http://dx.doi.org/10.1002/aenm.201301465>
3. Solovan M. N., Mostovoi A. I., Bilichuk S. V. et al. Structural and optical properties of  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$  films obtained by magnetron sputtering of a  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}$  alloy target // Physics of the Solid State. — 2017. — Vol. 59 (8). — P. 1643–1647. — <https://doi.org/10.1134/S1063783417080261>
4. Katagiri H., Jimbo K., Maw W.S. et al. Development of CZTS-based thin film solar cells // Thin Solid Films. — 2009. — Vol. 517, N. 7. — P. 2455–2460. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2008.11.002>
5. Ковалюк Т.Т., Солован М.Н., Мостовой А.И. и др. Исследование кристаллов  $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$  и гетеропереходов на их основе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2015. — № 5–6. — С. 45–49. — <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.5-6.45>
6. Nagaoka A., Miyake H., Taniyama T. et al. Effects of sodium on electrical properties in  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  single crystal // Applied Physics Letter. — 2014. — Vol. 104. — P. 152101. — <https://doi.org/10.1063/1.4871208>
7. Shibuya T., Goto Y., Ramihara Y. From kasterite to stannite photovoltaics: Stability and band gaps of the  $\text{Cu}_2(\text{Zn},\text{Fe})\text{SnS}_4$  alloy // Applied Physics Letters. — 2014. — Vol. 104. — P. 0219121–0219124. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.4862030>
8. Алфёров Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. — 1998. — № 32/1. — С. 3–18.
9. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. — Москва: Энергоатомиздат, 1987.
10. Mostovyi A. I., Brus V. V., Maryanchuk P.D. Charge transport mechanisms in anisotype  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$

- heterostructures // Semiconductors. — 2013. — Vol. 47. — P. 799–803. — <https://doi.org/10.1134/S1063782613060171>
11. Mebadi A., Houshmand M., Zandi M. H., Gorji N.E. Numerical analysis of  $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  nanostructured PV using SCAPS-1D // Nano Hybrids. — 2014. — Vol. 8. — P. 27–38. — <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/NH.8.27>
  12. Houshmand M., Hamid Esmaili, Hossein M. et al. Degradation and device physics modeling of  $\text{TiO}_2/\text{CZTS}$  ultrathin film photovoltaics // Materials Letters. — 2015. — Vol. 157. — P. 123–126. — <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.05.055>
  13. Wang Z., Brodusch N., Gauvina R., Demopoulos G. P. Nanoengineering of the  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{—TiO}_2$  interface via atomic layer deposition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  for high sensitivity photodetectors and solid state solar cells // Journal of Materials Chemistry A. — 2018. — Vol. 24. — <http://dx.doi.org/10.1039/C8TA02966K>
  14. Cui H., Liu X., Hao X. et al. Improvement of  $\text{Mo}/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  interface for  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) thin film solar cell application // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. — 2014. — Vol. 1638. — P. 1–7. — <https://doi.org/10.1557/opl.2014.208>
  15. Muska K., Kauk M., Grossberg M. et al. Influence of compositional deviations on the properties of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  monograin powders // Energy Procedia. — 2011. — Vol. 10. — P. 323–327. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.198>
  16. Nam D., Kim J., Lee J.-U. et al. Polarized Raman spectroscopy of Cu-poor and Zn-rich single-crystal  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  // Applied Physics Letters. — 2014. — Vol. 105. — P. 173903. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.4900560>
  17. Шарпа Б. Л., Пурохит Р. К. Полупроводниковые гетеропереходы. — Москва: Сов. Радио, 1979.
  18. Brus V. V., Ilashchuk M. I., Kovalyuk Z. D. et al. Mechanisms of charge transport in anisotype  $n\text{-TiO}_2/p\text{-CdTe}$  heterojunctions // Semiconductors. — 2011. — Vol. 45. — P. 1077. — <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782611080045>
  19. Barkhouse D. A. R., Gunawan O., Gokmen T. et al. Device Characteristics of a 10.1% Hydrazine-processed  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Se},\text{S})_4$  Solar Cell // Progress in Photovoltaics. — 2012. — Vol. 20. — P. 6–11. — <https://doi.org/10.1002/pip.1160>
  20. Wang X., Xie Y., Bateer B. et al. Selenization of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  enhanced the performance of dye-sensitized solar cells: improved zinc-site catalytic activity for  $\text{I}_3^-$  // ACS Appl. Mater. Interfaces. — 2017. — Vol. 9 (43). — P. 37662–37670. — <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.7b09642>
  21. Solovan M.M., Gavaleshko N.M., Brus V.V. et al. Fabrication and investigation of photosensitive  $\text{MoO}_x/n\text{-CdTe}$  heterojunctions // Semiconductor Science and Technology. — 2016. — Vol. 31. 105006. — <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/31/10/105006>

Дата поступления рукописи  
в редакцию 07.11 2017 г. — 11.10 2018 г.

Т. Т. КОВАЛЮК, Е. В. МАЙСТРУК, М. М. СОЛОВАН,  
І. П. КОЗЯРСЬКИЙ, П. Д. МАР'ЯНЧУК

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
E-mail: t.kovalyuk@chnu.edu.ua

## ДОСЛІДЖЕННЯ КРИСТАЛІВ $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ ТА ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ НА ЇХНІЙ ОСНОВІ

Найбільш перспективними матеріалами для створення перетворювачів сонячного випромінювання вважаються такі сполуки, як  $\text{CdTe}$  і тверді розчини  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ ,  $\text{Cu}(\text{In}, \text{S}, \text{Se})_2$ ,  $\text{CuGa}(\text{S}, \text{Se})_2$ . Однак неекологічність  $\text{Cd}$ ,  $\text{Te}$  та обмеженість земних запасів  $\text{In}$ ,  $\text{Ga}$ , а також їхня висока вартість змушує

ють дослідників замінювати In і Ga на більш поширені елементи II і IV груп, а саме на Zn і Sn. Крім цього, проводяться дослідження нових напівпровідникових сполук, таких як  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ,  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , а також твердих розчинів на їхній основі. Ці сполуки мають близьку до оптимальної для перетворення сонячної енергії ширину забороненої зони ( $E_g \approx 1,5$  eV), високий коефіцієнт поглинання світла ( $\approx 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ), великий час життя носіїв заряду, а також досить високу їх рухливість.

Також в даний час неухильно зростає інтерес до напівпровідникових гетеропереходів, таких як  $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ , що мають ряд переваг в порівнянні з гомопереходами.

У даній роботі представлено результати досліджень кінетичних властивостей кристалів  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ , створено анізотипні гетеропереходи  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , визначено їх основні електричні параметри та побудовано енергетичну діаграму.

Встановлено, що електропровідність кристалів  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  має металевий характер, тобто вона зменшується з ростом температури, що обумовлено зменшенням рухливості носіїв заряду. Коефіцієнт Холла не залежить від температури, що вказує на виродження носіїв заряду в напівпровіднику.

Анізотипні гетеропереходи  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  виготовлено методом магнетронного напилення тонких плівок  $\text{TiO}_2$  на підкладки з кристалів  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ . Енергетичну діаграму гетеропереходів було побудовано відповідно до моделі Андерсона, без урахування поверхневих електричних станів і діелектричного шару, на основі значень енергетичних параметрів напівпровідників визначених експериментально, а також взятих з літературних джерел. Досліджено електричні властивості гетеропереходів: визначено висоту потенціального бар'єру, значення послідовного і шунтуючого опорів при кімнатній температурі (відповідно,  $R_s = 8$  Ом,  $R_{sh} = 5,8$  кОм). Встановлено домінуючі механізми струмопереносу: в області напруги від 0 до 0,3 В — це тунельно-рекомбінаційний механізм, при зміщеннях від 0,3 до 0,45 В — це надбар'єрна емісія і тунелювання при зворотному зміщенні.

Ключові слова: кристали  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , кінетичні властивості,  $\text{TiO}_2$ , гетероперехід, тонка плівка, електричні властивості, механізми струмопереносу.

DOI: 10.15222/TKEA2018.5-6.37  
UDC 621.315.592

T. T. KOVALIUK, E. V. MAISTRUK, M. N. SOLOVAN,  
I. P. KOZIARSKYI, P. D. MARYANCHUK

Ukraine, Yurii Fedkovych Chernivtsi National University  
E-mail: t.kovalyuk@chnu.edu.ua

## STUDY ON $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ CRYSTALS AND HETEROJUNCTIONS ON THEIR BASIS

The most promising materials for the solar radiation converters are such compounds as CdTe and  $\text{Cu(In, Ga)Se}_2$ ,  $\text{CuIn(S, Se)}_2$ ,  $\text{CuGa(S, Se)}_2$  solid solutions. However, the uneconomic nature of Cd, Te and the limited supply of In and Ga, as well as their high cost, force researchers to replace In and Ga with the more common elements of II and IV groups, namely Zn and Sn. Apart from that, researchers are now testing such new semiconductor compounds as  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ,  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , and solid solutions on their basis. These compounds have a band gap width ( $E_g \approx 1.5$  eV) close to optimal for the conversion of solar energy, a high light absorption coefficient ( $\approx 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ), a long lifetime and a high mobility of charge carriers.

Moreover, the interest in such semiconductor heterojunctions as  $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ , which have several advantages over homo-transitions, is steadily growing at present.

The paper presents results studies of kinetic properties of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  crystals. We fabricated  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  anisotype heterojunctions, determined their main electrical parameters and built their energy diagram. The  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  crystals have p-type conductivity and the Hall coefficient practically independent of temperature. The temperature dependence of the electrical conductivity for  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  crystals is metallic in character, i. e.  $\sigma$  decreases with increasing temperature, which is caused by a decrease in the mobility of the charge carriers with the growth of T. Thermoelectric power for the samples is positive, which also indicates the prevalence of p-type conductivity.

In this study, the  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  heterojunctions were produced by reactive magnetron sputtering of a thin  $\text{TiO}_2$  film on the  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  substrate. The energy diagram of the investigated  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  anisotype heterojunctions was constructed in accordance with the Anderson model, without taking into account the surface electrical states and the dielectric layer, based on the values of the energy parameters of semiconductors determined experimentally and taken from literary sources. The authors have also investigated electrical properties of the heterojunctions: the value of the potential barrier was determined, the value of



the series resistance and shunt resistance (respectively,  $R_s = 8 \Omega$  and  $R_{sh} = 5.8 \text{ k}\Omega$ ) at room temperature. The dominant mechanisms of current transfer were established: tunneling-recombination mechanism in the voltage range from 0 to 0.3 V, and over-barrier emission and tunneling with inverse displacement in the voltage range from 0.3 to 0.45 V.

**Keywords:**  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  crystals, kinetic properties,  $\text{TiO}_2$ , heterojunction, thin film, electrical properties, current transfer mechanisms.

## REFERENCES

- Green M.A., Hishikawa Y., Warta W. et al. Solar cell efficiency tables (version 50). *Progress in Photovoltaics*, 2017, pp. 668-676. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.2909>
- Wang W., Winkler M.T., Gunawan O. et al. Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency. *Advanced Energy Materials*, 2014, Vol. 4, pp. 1-5. <http://dx.doi.org/10.1002/aenm.201301465>
- Solovan M. N., Mostovoi A. I., Bilichuk S. V. et al. Structural and optical properties of  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$  films obtained by magnetron sputtering of a  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}$  alloy target. *Physics of the Solid State*, 2017, vol. 59 (8), pp. 1643-1647. <https://doi.org/10.1134/S1063783417080261>
- Katagiri H., Jimbo K., Maw W.S. et al. Development of CZTS-based thin film solar cells. *Thin Solid Films*, 2009, vol. 517, no. 7, pp. 2455-2460. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2008.11.002>
- Kovaliuk T. T., Solovan M. N., Mostovyi A. I. et al. Research on  $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$  crystals and heterojunctions based on such crystals. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2015, no. 5-6, pp. 45-49. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.5-6.45> (Rus)
- Nagaoka A., Miyake H., Taniyama T. et al. Effects of sodium on electrical properties in  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  single crystal. *Applied Physics Letter*, 2014, vol. 104, pp. 152101. <https://doi.org/10.1063/1.4871208>
- Shibuya T., Goto Y., Ramihara Y. From kasterite to stannite photovoltaics: Stability and band gaps of the  $\text{Cu}_2(\text{Zn},\text{Fe})\text{SnS}_4$  alloy. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 104, pp. 0219121-0219124. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4862030>
- Alferov Zh. I. The history and future of semiconductor heterostructures. *Semiconductors*, 1998, vol. 32, iss. 1, pp. 1-14.
- Fahrenbruch A.L., Bube R.H. Fundamentals of solar cells. *Photovoltaic solar energy conversion*, New York, 1983.
- Mostovyi A.I., Brus V.V., Maryanchuk P.D. Charge transport mechanisms in anisotype  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}$  heterostructures. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, pp. 799-803. <https://doi.org/10.1134/S1063782613060171>
- Mebadi A., Houshmand M., Zandi M. H., Gorji N.E. Numerical analysis of  $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  nanostructured PV using SCAPS-1D. *Nano Hybrids*, 2014, vol. 8, pp. 27-38. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/NH.8.27>
- Houshmand M., Hamid Esmaili, Hossein M. et al. Degradation and device physics modeling of  $\text{TiO}_2/\text{CZTS}$  ultrathin film photovoltaics. *Materials Letters*, 2015, vol. 157, pp. 123-126. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.05.055>
- Wang Z., Brodusch N., Gauvina R., Demopoulos G. P. Nanoengineering of the  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-TiO}_2$  interface via atomic layer deposition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  for high sensitivity photodetectors and solid state solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, vol. 24. <http://dx.doi.org/10.1039/C8TA02966K>
- Cui H., Liu X., Hao X. et al. Improvement of  $\text{Mo}/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  interface for  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) thin film solar cell application. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 2014, vol. 1638, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1557/opl.2014.208>
- Muska K., Kauk M., Grossberg M. et al. Influence of compositional deviations on the properties of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  monograin powders. *Energy Procedia*, 2011, vol. 10, pp. 323-327. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.198>
- Nam D., Kim J., Lee J.-U. et al. Polarized Raman spectroscopy of Cu-poor and Zn-rich single-crystal  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ . *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 105, pp. 173903. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4900560>
- Sharma B.L., Purohit R.K. *Semiconductor Heterojunctions*. Pergamon Press, 1974.
- Brus V. V., Ilashchuk M. I., Kovalyuk Z. D. et al. Mechanisms of charge transport in anisotype  $n\text{-TiO}_2/p\text{-CdTe}$  heterojunctions. *Semiconductors*, 2011, vol. 45, pp. 1077. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782611080045>
- Barkhouse D.A.R., Gunawan O., Gokmen T. et al. Device Characteristics of a 10.1% Hydrazine-processed  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Se},\text{S})_4$  Solar Cell. *Progress in Photovoltaics*, 2012, vol. 20, pp. 6-11. <https://doi.org/10.1002/pip.1160>
- Wang X., Xie Y., Bateer B. et al. Selenization of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  enhanced the performance of dye-sensitized solar cells: improved zinc-site catalytic activity for I3. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, vol. 9 (43), pp. 37662-37670. <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.7b09642>
- Solovan M.M., Gavaleshko N.M., Brus V.V. et al. Fabrication and investigation of photosensitive  $\text{MoO}_x/n\text{-CdTe}$  heterojunctions. *Semiconductor Science and Technology*, 2016, vol. 31, 105006. <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/31/10/105006>

## Описание статьи для цитирования:

Ковалюк Т. Т., Майструк Э. В., Солован М. Н., Козарский И. П., Марьянчук П. Д. Исследование кристаллов  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  и гетеропереходов на их основе. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 5-6, с. 37—43. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.37>

## Cite the article as:

Kovaliuk T. T., Mastruk E. V., Solovan M. N., Kozarskiy I. P., Maryanchuk P. D. Study on  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  crystals and heterojunctions on their basis. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 5-6, pp. 37-43. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.37>

О. Г. ТРУБАЕВА<sup>1</sup>, М. А. ЧАЙКА<sup>2</sup>

Украина, г. Харьков, <sup>1</sup>Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины;  
Польша, г. Вроцлав, <sup>2</sup>Институт низкотемпературных и структурных исследований ПАН  
E-mail: trubaeva.olya@gmail.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ СМЕШАННЫХ КРИСТАЛЛОВ $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$

*Исследованы смешанные кристаллы  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  разного состава ( $x = 0,07 - 0,39$ ), выращенные методом Бриджмена — Стокбаргера. Прозрачность образцов (толщина 4 мм) составляла 61–67% на длине волны 1100 нм, что указывает на высокое оптическое качество кристаллов. Установлено, что ширина запрещенной зоны исследованных кристаллов плавно зависит от состава. Оптическая ширина запрещенной зоны составляет 2,59–2,78 эВ для прямых переходов и 2,49–2,70 эВ для непрямых.*

**Ключевые слова:** ширина запрещенной зоны, смешанные кристаллы  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ , прямой переход, непрямой переход.

В последние годы много внимания было уделено исследованиям рентгеновских и гамма-детекторов на основе полупроводниковых соединений  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$  [1]. Ширина запрещенной зоны в таких полупроводниках является важным параметром, который влияет на энергетическое разрешение, энергию ионизации, темновой ток и другие сцинтилляционные характеристики. Первые рентгеновские и гамма-детекторы на основе  $\text{ZnSe}$  были разработаны в 1960-х годах, а в настоящее время большая часть детекторов выполняется на основе сцинтилляторов  $\text{ZnSe}(\text{Te})$  и  $\text{ZnSe}(\text{Al})$  [2].

По сравнению с  $\text{ZnSe}$  полупроводники  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  имеют более широкую запрещенную зону, что позволяет создавать детекторы на основе  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  с лучшими сцинтилляционными характеристиками. Большое различие атомных номеров Zn и S по сравнению с Zn и Se расширяет спектральный диапазон детекторов на основе  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  в высокоэнергетическую область.

В настоящее время существует несколько публикаций по получению материалов  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  [3–8], однако получение крупногабаритных кристаллов  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  с требуемыми свойствами все еще является проблемой.

Изменение содержания серы в смешанных кристаллах  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  зависит от условий их выращивания и может привести к появлению различных дефектов или изменению типа химических связей, которые, в свою очередь, влияют на ширину оптической запрещенной зоны [9, 10]. В связи с этим во многих работах сообщается о ширине запрещенной зоны  $\text{ZnSe}$  в пределах от 2,25 эВ [11] и до 3,23 эВ [12]. При этом требует исследования зависимость оптической ши-

рины запрещенной зоны от содержания серы в объемных кристаллах  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ , выращенных методом направленной кристаллизации.

В настоящей статье обсуждается возможность изменения оптической ширины запрещенной зоны путем контроля содержания серы в смешанных кристаллах  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ .

### Экспериментальные образцы и методика проведения исследований

Образцы смешанных кристаллов  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  получали из предварительно спеченной шихты различного состава (от  $x = 0,05$  до  $x = 0,3$ ) и отожженной в кварцевом тигле при температуре 1170 К в течение 5 часов в атмосфере водорода для удаления кислородных примесей.

Кристаллы выращивали методом Бриджмена — Стокбаргера в графитовых тиглях диаметром 25 мм в атмосфере Ar ( $P_{\text{Ar}} = 2 \cdot 10^6$  Па), скорость кристаллизации составляла 7 мм/ч, температура нагревателя находилась в диапазоне от 1870 до 2000 К в зависимости от состава исходной шихты. Выращенные кристаллы отжигали в парах цинка ( $T = 1223$  К,  $P_{\text{Zn}} = 5 \cdot 10^7$  Па,  $t = 48$  ч), который использовался для окончательного образования люминесцентных центров, а также для подавления безызлучательных каналов релаксации, возбуждаемых носителями заряда. После этого проводилось шлифование и полирование образцов алмазным порошком.

Для определения содержания катионных примесей, а также фактического состава выращенных кристаллов проводили химический анализ. В результате было установлено, что полученные образцы имеют следующий со-

став:  $\text{ZnS}_{0,07}\text{Se}_{0,93}$ ;  $\text{ZnS}_{0,15}\text{Se}_{0,85}$ ;  $\text{ZnS}_{0,22}\text{Se}_{0,78}$ ;  $\text{ZnS}_{0,28}\text{Se}_{0,72}$ ;  $\text{ZnS}_{0,32}\text{Se}_{0,68}$ ;  $\text{ZnS}_{0,39}\text{Se}_{0,61}$ .

Спектры пропускания кристаллов были измерены на однолучевом спектрофотометре Shimadzu UVmini-1240. Коэффициент линейных оптических потерь вычислялся в соответствии с законом Ламберта — Бера с учетом отражения Френеля на границе раздела «образец — воздух»:

$$a = \frac{1}{h} \ln \frac{(1-R)^2}{T}, \quad (1)$$

где  $a$  — коэффициент поглощения;

$h$  — толщина образца;

$R$  — коэффициент отражения, который зависит от длины волны,  $R = [(n_2 - n_1) / (n_2 + n_1)]^2$ ;

$T$  — коэффициент линейного светопропускания;

$n_1, n_2$  — показатели преломления входной и выходной среды соответственно [13].

Химический анализ образцов на содержание S и Se проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Для оптических исследований использовали оптический эмиссионный спектрометр CAP 6300 Duo (Thermo Scientific, США). Предел измерения составлял  $10^{-1} - 10^{-5}$  мас. %, точность определения — до 0,5% от измеряемой величины.

### Полученные результаты и их обсуждение

Значения оптической ширины запрещенной зоны образцов были определены по спектрам оптического пропускания ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного излучения, полученным при комнатной температуре (рис. 1). Толщина образцов составляла 4 мм. Было установлено, что при  $\lambda = 1100$  нм пропускание образ-

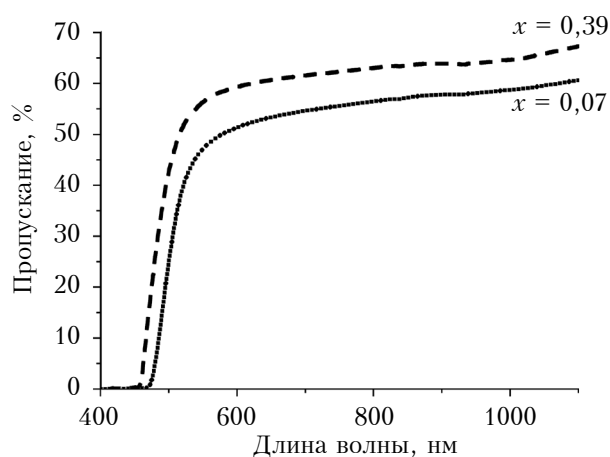


Рис. 1. Спектры оптического пропускания двух исследуемых образцов  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  различного состава

цов лежало в диапазоне от 67% (для  $x = 0,39$ ) до 61 % (для  $x = 0,07$ ), что свидетельствует о высоком оптическом качестве кристаллов.

Для оптоэлектронных устройств предпочтительнее использовать полупроводниковые соединения с прямозонной энергетической структурой, спектральный диапазон которых лежит в области фундаментального поглощения.  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  является типичными полупроводником с прямозонной энергетической структурой.

Определение ширины запрещенной зоны из края собственного поглощения света полупроводником и фотопроводимости основано на возбуждении валентного электрона и его переходе в зону проводимости за счет поглощаемой энергии фотона. Для расчета ширины запрещенной зоны коэффициент пропускания был пересчитан в коэффициент оптических потерь в соответствии с уравнением (1) и использовался для расчета прямых и непрямых переходов [16, 17].

Прямые переходы (прямая межзонная рекомбинация) совершаются практически без изменения импульса электрона и могут сопровождаться выделением фотона. Коэффициент поглощения прямого перехода описывается формулой

$$a \approx (E_{pt} - E_g)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $E_g$  — область между валентной зоной и зоной проводимости;

$E_{pt}$  — энергия фотона [16].

Непрямые переходы в кристаллах происходят с изменением импульса электрона в результате взаимодействия электрона с решеткой. Непрямой переход всегда заканчивается выделением энергии в виде фононов и описывается так:

$$a \approx (E_{pt} - E_g + E_{ph})^2, \quad (3)$$

где  $E_{ph}$  — энергия фононов [17].

На рис. 2 приведены графики зависимости квадрата ( $a^2$ ) и корня квадратного ( $a^{1/2}$ ) коэффициента поглощения от энергии фотона. Если линейную часть этих зависимостей экстраполировать на линию нулевого коэффициента поглощения, то значения энергии, полученные из графиков функции  $a^2 = f(E)$ , будут соответствовать прямому переходу кристалла [16], а из графиков функции  $a^{1/2} = f(E)$  — непрямому.

Проведенный анализ показал, что для кристаллов  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  при увеличении содержания серы  $x$  от 0,07 до 0,39 ширина запрещенной зоны прямых переходов ( $E_{g1}$ ) возрастает от 2,59 до 2,78 эВ, а непрямых ( $E_{g2}$ ) — от 2,49 до 2,70 (см. таблицу).

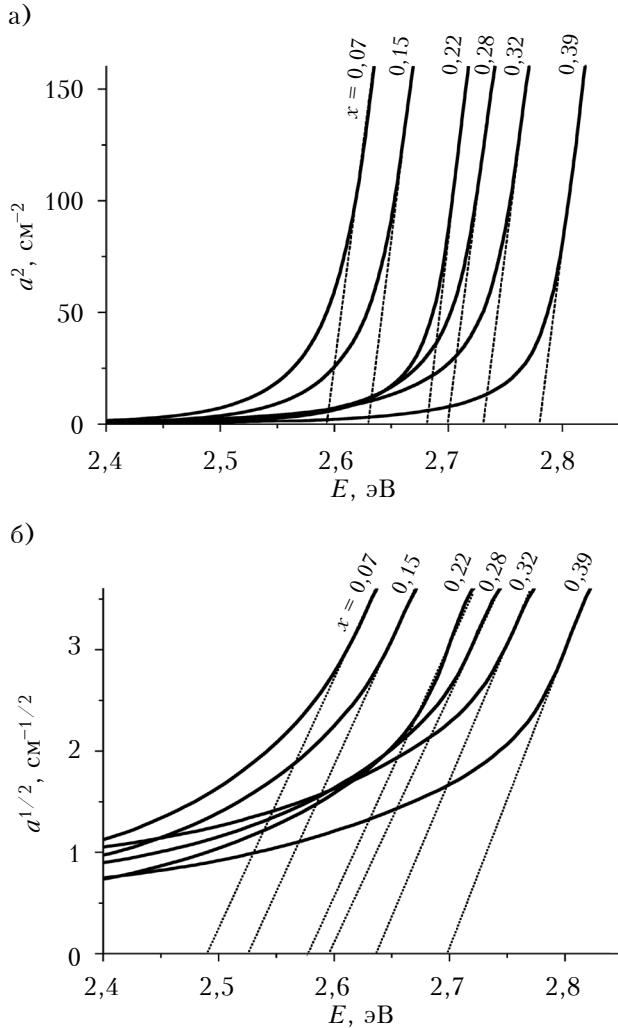


Рис. 2. Зависимость квадрата (а) и корня квадратного (б) коэффициента поглощения от энергии фотонов шести исследуемых образцов  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  различного состава

Ширина запрещенной зоны прямых и не прямых переходов смешанных кристаллов  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$

Образец	$E_{g1}$ , эВ	$E_{g2}$ , эВ
$\text{ZnS}_{0,07}\text{Se}_{0,93}$	2,59	2,49
$\text{ZnS}_{0,15}\text{Se}_{0,85}$	2,63	2,57
$\text{ZnS}_{0,22}\text{Se}_{0,78}$	2,68	2,58
$\text{ZnS}_{0,28}\text{Se}_{0,72}$	2,70	2,60
$\text{ZnS}_{0,32}\text{Se}_{0,68}$	2,73	2,64
$\text{ZnS}_{0,39}\text{Se}_{0,61}$	2,78	2,70

Спектры пропускания измерялись в разных частях каждого кристалла по пять раз, и погрешность результатов измерений прямых и не прямых переходов составила не более 0,01 эВ.

Графики зависимости ширины запрещенной зоны в кристалле  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  в зависимости от со-

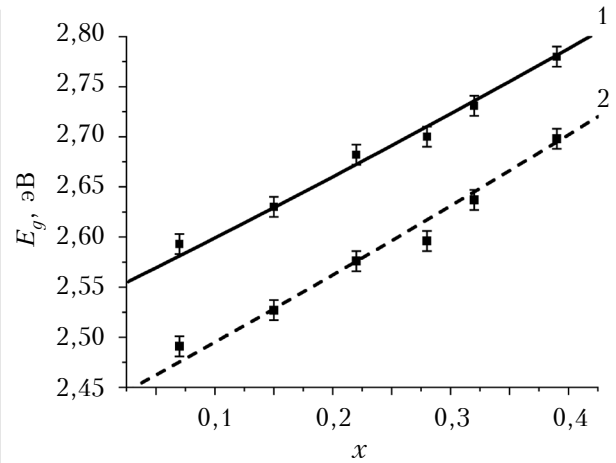


Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны от концентрации серы для прямых (1) и не прямых (2) переходов смешанных кристаллов  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  (точки — экспериментальные результаты, полученные для шести исследуемых образцов; линии — зависимости, рассчитанные по уравнению (4))

держания серы приведены на рис. 3. Эти зависимости могут быть описаны уравнением

$$E_g(x) \approx xE_A + (1-x)E_B - bx(1-x), \quad (4)$$

где  $b$  — переменный параметр [18];

$E_A$ ,  $E_B$  — ширина запрещенной зоны прямых или не прямых переходов  $\text{ZnS}$  и  $\text{ZnSe}$ .

Анализ показывает, что значение параметра  $b$  в данном случае составляет 0,1, что согласуется с диапазоном значений данного параметра, встречающихся в литературе ( $b = 0 - 0,63$ ) [19, 20–23].

С помощью этого уравнения была рассчитана ширина запрещенной зоны чистых соединений  $\text{ZnS}$  и  $\text{ZnSe}$  для прямых и не прямых переходов:  $E_{g1}(\text{ZnS}) = 3,22$  эВ;  $E_{g1}(\text{ZnSe}) = 2,54$  эВ;  $E_{g2}(\text{ZnS}) = 3,17$  эВ;  $E_{g2}(\text{ZnSe}) = 2,43$  эВ.

Полученные значения ширины оптической запрещенной зоны (3,22 и 2,54 эВ) близки к величинам, указанным для кристаллов  $\text{ZnS}$  и  $\text{ZnSe}$  в литературе (3,54 и 2,58 эВ соответственно) [22, 23]. Заниженная величина ширины запрещенной зоны для чистого  $\text{ZnS}$  вызвана, вероятно, погрешностью измерения параметра  $b$ , связанной с отсутствием экспериментальных данных при большом содержании серы в кристалле.

### Заключение

В нормальном изовалентном  $\text{AB}_x\text{C}_{1-x}$  кристалле увеличение  $x$  приводит к плавному изменению зоны проводимости и валентной зоны, при этом формирования новых (дефектных) уровней в запрещенной зоне не происходит. Высокое оптическое качество исследованных образцов и плавная зависимость их оптической ширины за-



препещенной зоны от состава указывают на возможность выращивания смешанных кристаллов  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  методами направленной кристаллизации для рентгеновских и гамма-детекторов.

Более широкая запрещенная зона и более высокое атомное соотношение полупроводника  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  по сравнению с кристаллами  $\text{ZnSe}(\text{Te}, \text{Al})$  расширяют область его применения. Кроме того, может быть предложен совершенно иной тип рентгеновских и гамма-детекторов на основе  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ .

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Emam-Ismail M., El-Hagary M., Ramadan E. et al. Influence of g-irradiation on optical parameters of electron beam evaporated  $\text{ZnSe}_{1-x}\text{Te}_x$  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>
2. Shcotanus P., Dorenbos P., Ryzhikov V. Detection of  $\text{CdS}(\text{Te})$  and  $\text{ZnSe}(\text{Te})$  scintillation light with silicon photodiodes // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. — 1992. — Vol. 39, iss. 4. — P. 546–550. — <https://doi.org/10.1109/23.159663>
3. Hussein R. H., Pages O., Firszt F. et al. Near-forward Raman study of a phonon-polariton reinforcement regime in the  $\text{Zn}(\text{Se}, \text{S})$  alloy // *Journal of Applied Physics*. — 2014. — Vol. 116, iss. 8. — P. 083511. — <https://doi.org/10.1063/1.4893322>
4. Hussein R.H., Pages O., Doyen-Schuler S. et al. Percolation-type multi-phonon pattern of  $\text{Zn}(\text{Se}, \text{S})$ : 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>
5. Hussein R. H., Pages O., Polian A. et al. Pressure-induced phonon freezing in the  $\text{ZnSeS}$  II–VI mixed crystal: phonon-polaritons and ab initio calculations // *Journal of Physics: Condensed Matter*. — 2016. — Vol. 28, iss. 20. — P. 205401. — <https://stacks.iop.org/0953-8984/28/i=20/a=205401>
6. Song J.H., Sim E.D., Baek K.S. et al. Optical properties of  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  ( $x < 0.18$ ) random and ordered alloys grown by metalorganic atomic layer epitaxy // *Journal Crystal Growth*. — 2000. — Vol. 214. — P. 460–464. — [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(00\)00130-5](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(00)00130-5)
7. Prete P., Lovergine N., Petroni S. et al. Functional validation of novel Se and S alkyl precursors for the low temperature pyrolytic MOVPE growth of  $\text{ZnSe}$ ,  $\text{ZnS}$  and  $\text{ZnSSe}$  // *Materials Chemistry and Physics*. — 2000. — Vol. 66, iss. 2. — P. 253–258. — [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(00\)00317-5](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(00)00317-5)
8. Lai L.S., Sou I.K., Law C.W. et al.  $\text{ZnSSe}$ -based ultraviolet photodiodes with extremely high detectivity // *Optical Materials*. — 2003. — Vol. 23, iss. 1. — P. 21–26. — [https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(03\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(03)00053-3)
9. Venkatachalam S., Mangalaraj D., Narayandass S. et al. The effect of nitrogen ion implantation on the structural, optical and electrical properties of  $\text{ZnSe}$  thin films // *Semiconductors Science and Technology*. — 2006. — Vol. 21, iss. 12. — P. 1661. — <https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/12/027>
10. Chen Y., Li J., Yang X. et al. Band gap modulation of the IV, III–V, and II–VI semiconductors by controlling the solid size and dimension and the temperature of operation // *Journal of Physical Chemistry C*. — 2011. — Vol. 115, iss. 47. — P. 23338–23343. — <https://doi.org/10.1021/jp209933v>
11. Alghamdi Y. Composition and band gap controlled AACVD of  $\text{ZnSe}$  and  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  thin films using novel single source precursors // *Materials Sciences and Applications*. — 2017. — Vol. 8, iss. 10. — P. 726–737. — <https://doi.org/10.4236/msa.2017.810052>
12. Pejova B., Abay B., Bineva L. et al. Temperature dependence of the band-gap energy and sub-band-gap absorption tails in strongly quantized  $\text{ZnSe}$  nanocrystals deposited as thin films // *Journal of Physical Chemistry C*. — 2010. — Vol. 114, iss. 36. — P. 15280. — <https://doi.org/10.1021/jp102773z>
13. Judd D.B. Fresnel reflection of diffusely incident light // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. — 1942. — Vol. 29, iss. 5. — P. 329–332.
14. Bube R.H. Photoconductivity of Solids. — Wiley, 1960.
15. Summit R., Marley J.A., Borrelly N.F. et al. The ultraviolet absorption edge of stannic oxide ( $\text{SnO}_2$ ) // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. — 1964. — Vol. 25, iss. 12. — P. 1465–1469. — [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(64\)90063-0](https://doi.org/10.1016/0022-3697(64)90063-0)
16. Bernard J.E., Zunger A. Electronic structure of  $\text{ZnS}$ ,  $\text{ZnSe}$ ,  $\text{ZnTe}$  and their pseudobinary alloys // *Physical Review*. — 1987. — Vol. 36, iss. 6. — P. 3199–3228. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.36.3199>
17. Homman T., Hotje U., Binnewies M. et al. Composition dependent band gap in  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  a combined experimental and theoretical study // *Solid State Sciences*. — 2006. — Vol. 8, iss. 1. — P. 44–49. — <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2005.08.015>
18. El-Shazly A.A., El-Naby M.M., Kenawy M.A. et al. Optical properties of ternary  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  polycrystalline thin films // *Journal of Applied Physics. A*. — 1985. — Vol. 36, iss. 1. — P. 51–53. — <https://doi.org/10.1007/BF00616461>
19. Larach S., Shrader R.E., Stocker C.F. Anomalous variation of band gap with composition in zinc sulfo- and seleno-tellurides // *Physical Review*. — 1957. — Vol. 108, iss. 3. — P. 587–593. — <https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.587>
20. Ebina A., Fukunaga E., Takahashi T. Variation with composition of the  $E_0$  and  $E_0 + \Delta_0$  gaps in  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  alloys // *Physical Review*. — 1974. — Vol. 10. — P. 2495–2500. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.10.2495>
21. Suslina L.G., Fedorov D.L., Konnikov S.G. et al. Dependence of the forbidden-band width on composition of  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  mixed-crystals // *Soviet physics: Semiconductors*. — 1977. — Vol. 11, iss. 10. — P. 1132.
22. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник / Под ред. А.В. Новоселовой, В.Б. Лазарева. — Москва: Наука, 1979.
23. Herve P., Vandamme L.K. General relation between refractive index and energy gap in semiconductors // *Infrared Physics and Technology*. — 1994. — Vol. 35, iss. 4. — P. 609–615. — [https://doi.org/10.1016/1350-4495\(94\)90026-4](https://doi.org/10.1016/1350-4495(94)90026-4)

Дата поступления рукописи  
в редакцию 12.10 2018 г.

Україна, м. Харків, <sup>1</sup>Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України;  
Польща, м. Вроцлав, <sup>2</sup>Інститут низьких температур та структурних досліджень ПАН  
E-mail: trubaeva.olya@gmail.com

## ДОСЛІДЖЕННЯ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ В ЗМІШАНИХ КРИСТАЛАХ $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$

Сцинтилятори на основі  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  є перспективними матеріалами для рентгенівських і гамма-детекторів. Для оптоелектронних пристроїв краще використовувати напівпровідникові сполуки з прямозонною енергетичною структурою, спектральний діапазон яких лежить в області фундаментального поглинання. Ширина забороненої зони в таких напівпровідниках є важливим параметром, який впливає на енергетичну роздільну здатність, енергію іонізації, темновий струм і інші сцинтиляційні характеристики.

У даній роботі досліджено вплив вмісту сірки на оптичну ширину забороненої зони в змішаних кристалах  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ .

Зразки для досліджень були вирощені методом Бріджмена — Стокбаргера в графітових тиглях діаметром 25 мм в атмосфері аргону ( $P_{\text{Ar}} = 2 \cdot 10^6$  Па) за температури від 1870 до 2000 К залежно від складу вихідної шихти. Отримано шість зразків з різним вмістом компонентів, а саме:  $\text{ZnS}_{0,07}\text{Se}_{0,93}$ ;  $\text{ZnS}_{0,15}\text{Se}_{0,85}$ ;  $\text{ZnS}_{0,22}\text{Se}_{0,78}$ ;  $\text{ZnS}_{0,28}\text{Se}_{0,72}$ ;  $\text{ZnS}_{0,32}\text{Se}_{0,68}$ ;  $\text{ZnS}_{0,39}\text{Se}_{0,61}$ .

Прозорість зразків становила від 61 до 67% на довжині хвилі 1100 нм (товщина зразків 4 мм), що вказує на високу оптичну якість кристалів.

Встановлено, що для змішаних кристалів  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  зі зростанням вмісту сірки  $x$  від 0,07 до 0,39 оптична ширина забороненої зони зростає від 2,59 до 2,78 еВ для прямих переходів і від 2,49 до 2,70 еВ для непрямих. Проведено порівняння між теоретичними і експериментально отриманими значеннями ширини забороненої зони.

Показано, що ширина забороненої зони досліджуваних зразків плавно залежить від складу, при цьому формування нових (дефектних) рівнів в забороненій зоні не відбувається, що вказує на можливість вирощування  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  змішаних кристалів методами спрямованої кристалізації для використання як рентгенівських і гамма-детекторів. Більш широка заборонена зона і більш високе атомне співвідношення напівпровідника  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  в порівнянні з кристалами  $\text{ZnSe}(\text{Te}, \text{Al})$  розширюють область його застосування.

Ключові слова: ширина забороненої зони, змішані кристали  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ , прямі переходи, непрямі переходи.

DOI: 10.15222/TKEA2018.5-6.44  
UDC 535-34; 535-36

O. G. TRUBAIEVA<sup>1</sup>, M. A. CHAIKA<sup>2</sup>

Ukraine, Kharkiv, <sup>1</sup>Institute for Scintillation  
Materials of the NAS of Ukraine;  
Polska, Wroclaw, <sup>2</sup>Institute of Low Temperature  
and Structure Research, Polish Academy of Sciences  
E-mail: trubaeva.olya@gmail.com

## INVESTIGATION OF BAND GAP WIDTH IN MIXED $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ CRYSTALS

Scintillators based on  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  are promising materials for X-ray and  $\gamma$ -ray detection. For optoelectronic devices, it is better to use semiconductor compounds with a direct-zone energy structure with its spectral range lying in the fundamental absorption region. The band gap in such semiconductors is an important parameter that affects the energy resolution, ionization energy, dark current and other scintillation characteristics.

The effect of sulfur content on the optical width of the band gap in mixed crystals  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  is investigated in this paper.

The test samples for this study were grown by Bridgman-Stockbarger in graphite crucibles with the diameter of 25 mm in the Ar atmosphere ( $P_{\text{Ar}} = 2 \cdot 10^6$  Pa) at a temperature from 1870 to 2000 K, depending on the composition of the initial raw materials. Six samples with different content of components were obtained:  $\text{ZnS}_{0,07}\text{Se}_{0,93}$ ,  $\text{ZnS}_{0,15}\text{Se}_{0,85}$ ,  $\text{ZnS}_{0,22}\text{Se}_{0,78}$ ,  $\text{ZnS}_{0,28}\text{Se}_{0,72}$ ,  $\text{ZnS}_{0,32}\text{Se}_{0,68}$ ,  $\text{ZnS}_{0,39}\text{Se}_{0,61}$ .

The transmittance of the samples in the range from 61 to 67% at 1100 nm (sample thickness 4 mm) indicates a high optical quality of the crystals.

It was established that the optical width of the band gap for mixed crystals  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  increases from 2.59 to 2.78 eV with increasing sulfur content from 0.07 to 0.39 for direct transitions and from 2.49 to 2.70 eV for indirect transitions. A comparison was made between theoretical and experimentally obtained values of the band gap width.

It is shown that no new (defective) levels appear in the band gap. The smooth dependence of the optical band gap on the composition indicate a possibility of growing  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  mixed crystals by directional solidification techniques for X-ray and  $\gamma$ -ray detectors. The wider band gap and higher atomic mass ratio of  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  crystals, as compared to  $\text{ZnSe}(\text{Te})$  or/and  $\text{ZnSe}(\text{Al})$  crystals, extend application areas of such semiconductor material.

**Keywords:** band gap width, mixed crystals  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ , direct transitions, indirect transitions.

## REFERENCES

1. Emam-Ismael M., El-Hagary M., Ramadan E. et al. Influence of g-irradiation on optical parameters of electron beam evaporated  $\text{ZnSe}_{1-x}\text{Te}_x$  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>
2. Shcotanus P., Dorenbos P., Ryzhikov V. Detection of  $\text{CdS}(\text{Te})$  and  $\text{ZnSe}(\text{Te})$  scintillation light with silicon photodiodes. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1992, vol. 39, iss. 4, pp. 546–550, <https://doi.org/10.1109/23.159663>
3. Hajj Hussein R., Pagès O., Firszt F. et al. Near-forward Raman study of a phonon-polariton reinforcement regime in the  $\text{Zn}(\text{Se}, \text{S})$  alloy. *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 116, iss. 8, pp. 083511, <https://doi.org/10.1063/1.4893322>
4. Hussein, R.H., Pagès O., Doyen-Schuler S. et al. Percolation-type multi-phonon pattern of  $\text{Zn}(\text{Se}, \text{S})$ : 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>
5. Hussein R.H., Pagès O., Polian A. et al. Pressure-induced phonon freezing in the  $\text{ZnSeS}$  II–VI mixed crystal: phonon-polaritons and ab initio calculations. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2016, vol. 28, iss. 20, pp. 205401, <https://stacks.iop.org/0953-8984/28/i=20/a=205401>
6. Song J.H., Sim E.D., Baek K.S. et al. Optical properties of  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  ( $x < 0.18$ ) random and ordered alloys grown by metalorganic atomic layer epitaxy. *Journal Crystal Growth*, 2000, vol. 214, pp. 460–464, [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(00\)00130-5](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(00)00130-5)
7. Prete P., Lovergine N., Petroni S. et al. Functional validation of novel Se and S alkyl precursors for the low temperature pyrolytic MOVPE growth of  $\text{ZnSe}$ ,  $\text{ZnS}$  and  $\text{ZnSSe}$ . *Materials Chemistry and Physics*, 2000, vol. 66, iss. 2, pp. 253–258, [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(00\)00317-5](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(00)00317-5)
8. Lai L.S., Sou I.K., Law C.W. et al.  $\text{ZnSSe}$ -based ultraviolet photodiodes with extremely high detectivity. *Optical Materials*, 2003, vol. 23, iss. 1, pp. 21–26, [https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(03\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(03)00053-3)
9. Venkatachalam S., Mangalaraj D., Narayandass S. et al. The effect of nitrogen ion implantation on the structural, optical and electrical properties of  $\text{ZnSe}$  thin films. *Semiconductors Science and Technology*, 2006, vol. 21, iss. 12, pp. 1661, <https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/12/027>
10. Chen Y., Li J., Yang X. et al. Band gap modulation of the IV, III–V, and II–VI semiconductors by controlling the solid size and dimension and the temperature of operation. *Journal of Physical Chemistry C*, 2011, vol. 115, iss. 47, pp. 23338–23343, <https://doi.org/10.1021/jp209933v>
11. Alghamdi Y. Composition and band gap controlled AACVD of  $\text{ZnSe}$  and  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  thin films using novel single source precursors. *Materials Sciences and Applications*, 2017, vol. 8, iss. 10, pp. 726–737, <https://doi.org/10.4236/msa.2017.810052>
12. Pejova B., Abay B., Bineva L. et al. Temperature dependence of the band-gap energy and sub-band-gap absorption tails in strongly quantized  $\text{ZnSe}$  nanocrystals deposited as thin films. *Journal of Physical Chemistry C*, 2010, vol. 114, iss. 36, pp. 15280, <https://doi.org/10.1021/jp102773z>
13. Judd D.B. Fresnel reflection of diffusely incident light. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1942, vol. 29, iss. 5, pp. 329–332.
14. Bube R.H. Photoconductivity of Solids, Wiley, 1960.
15. Summit R., Marley J.A., Borrelly N.F. et al. The ultraviolet absorption edge of stannic oxide ( $\text{SnO}_2$ ). *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1964, vol. 25, iss. 12, pp. 1465–1469, [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(64\)90063-0](https://doi.org/10.1016/0022-3697(64)90063-0)
16. Bernard J.E., Zunger A. Electronic structure of  $\text{ZnS}$ ,  $\text{ZnSe}$ ,  $\text{ZnTe}$  and their pseudobinary alloys. *Physical Review*, 1987, vol. 36, iss. 6, pp. 3199–3228, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.36.3199>
17. Homman T., Hotje U., Binnewies M. et al. Composition dependent band gap in  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  a combined experimental and theoretical study. *Solid State Sciences*, 2006, vol. 8, iss. 1, pp. 44–49, <https://doi.org/10.1016/j.solidstasciences.2005.08.015>
18. El-Shazly A.A., El-Naby M.M., Kenawy M.A. et al. Optical properties of ternary  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  polycrystalline thin films. *Journal of Applied Physics. A*, 1985, vol. 36, iss. 1, pp. 51–53, <https://doi.org/10.1007/BF00616461>
19. Larach S., Shrader R.E., Stocker C.F. Anomalous variation of band gap with composition in zinc sulfo- and seleno-tellurides. *Physical Review*, 1957, vol. 108, iss. 3, pp. 587–593, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.587>
20. Ebina A., Fukunaga E., Takahashi T. Variation with composition of the  $E_0$  and  $E_0 + \Delta_0$  gaps in  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  alloys. *Physical Review*, 1974, vol. 10, pp. 2495–2500, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.10.2495>
21. Suslina L.G., Fedorov D.L., Konnikov S.G. et al. Dependence of the forbidden-band width on composition of  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  mixed-crystals. *Soviet physics: Semiconductors*, 1977, vol. 11, iss. 10, pp. 1132.
22. Novoselova A.V., Lazarev V.B. (Eds.). *Physical and Chemical Properties of Semiconductors*. Moscow, Nauka, 1979, 340 p. (Rus)
23. Herve pp., Vandamme L.K. General relation between refractive index and energy gap in semiconductors. *Infrared Physics and Technology*, 1994, vol. 35, iss. 4, pp. 609–615, [https://doi.org/10.1016/1350-4495\(94\)90026-4](https://doi.org/10.1016/1350-4495(94)90026-4)

## Описание статьи для цитирования:

Трубаева О. Г., Чайка М. А. Исследование ширины запрещенной зоны смешанных кристаллов  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ . *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 5-6, с. 44–49. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.44>

## Cite the article as:

Trubaieva O. G., Chaika M. A. Investigation of band gap width in mixed  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  crystals. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2018, no. 5-6, pp. 44–49. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.44>

К. ф.-м. н. Е. В. МАЙСТРУК, к. ф.-м. н. І. П. КОЗЯРСЬКИЙ,  
к. ф.-м. н. Д. П. КОЗЯРСЬКИЙ, д. ф.-м. н. П. Д. МАР'ЯНЧУК

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
E-mail: d.koziarskyi@chnu.edu.ua

## ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКИХ ПЛІВОК $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$

*Досліджено тонкі плівки  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , отримані методом високочастотного магнетронного напылення попередньо синтезованого матеріалу на скляні підкладки. Було проведено вимірювання коефіцієнта відбивання за кімнатної температури, коефіцієнта пропускання в інтервалі температури від 111 до 290 K у діапазоні довжини хвилі 0,9–26 мкм. Отримані оптичні коефіцієнти дозволили визначити ширину оптичної забороненої зони досліджуваних плівок та її температурний коефіцієнт.*

**Ключові слова:** тонкі плівки, CZTSe, оптичні коефіцієнти, ширина оптичної забороненої зони, температурний коефіцієнт.

Сучасні тенденції розвитку науки і техніки підштовхують науковців до пошуку альтернативних, екологічно чистих і, по можливості, дешевих джерел енергії, до яких можна віднести сонячну енергію. Енергія сонця перетворюється в електричну за допомогою сонячних елементів. На сьогоднішній день сонячні батареї є достатньо коштовними, що робить собівартість отриманої електроенергії вищою за вироблену з традиційних видів палива.

Використання сонячних елементів в різних галузях науки і техніки сприяє розвитку матеріалознавства та наукової діяльності у цій сфері. Відомі раніше матеріали та різного роду сполуки, які використовуються у виготовленні сонячних елементів (на заміну непрямозонного кремнію), є дорогими, рідкісними або технологія їхнього виготовлення є достатньо складною. Останнім часом науковці займаються дослідженням оптичних та електричних властивостей таких матеріалів, як кастерити [1–10]. Кастерит є природним мінералом, який складається в основному з міді, цинку, олова, сірки і селену, тобто з доволі поширених у природі елементів. Тому і сонячні елементи, розроблені на основі кастериту, матимуть, на думку дослідників, низьку вартість. Крім того, кастерити відносяться до прямозонних напівпровідників з величиною забороненої зони 0,9–1,5 eV і мають великі значення коефіцієнта оптичного поглинання ( $\approx 10^4 \text{ см}^{-1}$ ).

Метою даної роботи є дослідження впливу температури на оптичні властивості тонких плівок кастеритів  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , отриманих методом

ВЧ-магнетронного розпилення синтезованих раніше матеріалів.

### Отримання зразків та методика проведення досліджень

Синтез проводили в електричній трубчастій печі. Для прискорення реакції між компонентами, густина яких сильно розрізняється, і одержання однорідних злитків  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  в процесі синтезу технологічна установка була обладнана пристроєм для коливання пічки з ампулою. Ампулу з шихтою поміщали у циліндричний контейнер, виготовлений із товстостінної жароміцної нержавіючої сталі, задля забезпечення рівномірного нагріву по довжині, а також запобігання руйнуванню пічки у разі її вибуху.

Під час синтезу сплавів  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  користувались діаграмами стану компонентів, що входять до складу цих сполук та твердих розчинів. Нагрів проводили поступово із витриманням температури плавлення компонентів протягом певного часу, що дозволяло вихідним компонентам краще прореагувати один з одним, внаслідок чого зменшується парціальний тиск їх парів (зокрема Se). Після досягнення температури плавлення досліджуваних кристалів їх поступово охолоджували.

Для виготовлення мішеней для ВЧ магнетронного розпилення використовували попередньо синтезовані сплави. Синтезований матеріал розтирали у фарфоровій ступі до дрібнодисперсного стану. Попередньо ступу та пест готували належним чином — промивали у плавикувній та азотній кислотах ОСЧ та дистильованій воді,



потім висушували. За допомогою гідравлічного пресу отриманий порошок впресовували у алюмінієвий стакан, внутрішній діаметр якого значно перевищував діаметр зони ерозії (зони розпилення) магнетрона, що запобігало розпиленню матеріалу стакану.

Для одержання тонких плівок методом ВЧ магнетронного розпилення використовували установку УВН-70. Для цього її обладнали магнетроном та штатний високовакуумний насос НВД-250 замінили на турбомолекулярний насос ТМН-500.

Для підтримки температури підкладок в межах від кімнатної до 600°C використовували спеціально розроблену та виготовлену пічку діаметром 100 мм з нержавіючої сталі (ніхромового дроту діаметром 0,8–0,9 мм). Така пічка має низький опір, напруга живлення становить 20–50 В, що запобігає виникненню електричного пробоя. Живлення пічки здійснювалось за допомогою лабораторних стабілізованих імпульсних джерел струму BVP 900–1500 Вт, які мають високі (десятки ампер) робочі струми. Слід зазначити, що галогенні лампи, які використовуються для нагріву підкладок, не дозволяють досягти температури вище за 300–350°C. Крім того, напруга їхнього живлення близька до мережевої, і за робочого тиску магнетронного розпилення ця величина, згідно закону Пашена, є достатньою для пробоя зі струмопровідних частин на корпус, особливо під час роботи магнетрона, коли в камері присутні атоми іонізованого робочого газу у великій кількості.

Контроль температури здійснювався за допомогою хромель-алюмелевої термопари.

Досліджувались оптичні властивості тонких плівок  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , які напилювали на підкладки з покривного скла стандартних розмірів за різних режимів: потужності магнетрону, часу напilenня, температури підкладки. Для подальших досліджень використовували плівки із найкращими параметрами.

Оптичні коефіцієнти визначали методом, оснований на незалежному вимірюванні коефіцієнтів відбивання ( $R$ ) та пропускання ( $t$ ) [11]. Коефіцієнт відбивання досліджували за кімнатної температури з використанням спектрофотометра Nicolet 6700 та спеціальної приставки Pike, коефіцієнт пропускання — за температури від 111 до 290 К за допомогою того ж самого спектрофотометра та спеціального вакуумного кріостату. Дослідження проводили у діапазоні довжини хвилі  $\lambda$  від 0,9 до 26 мкм.

Слід зазначити, що дослідження коефіцієнтів пропускання та відбивання необхідно проводити за однакових умов. В той же час, коефіцієнт пропускання  $t$  вимірюється за нормального падіння електромагнітного випромінюван-

ня (кут  $0^\circ$ ), а для коефіцієнта відбивання  $R$  забезпечити такі умови на практиці дуже важко. Результати вимірювання  $R$ , які були проведені у діапазоні значень кута падіння променя від  $50$  до  $30^\circ$  (менші кути не дозволяє отримати вимірювальна приставка), показали, так само як і у [12], дуже слабку зміну величини  $R$ . Тому було прийнято, що  $R(0^\circ) = R(30^\circ)$ , і для розрахунків показника поглинання  $k$  використовували значення  $R = R(30^\circ)$ .

### Результати досліджень та їх обговорення

Для коефіцієнта відбивання можна записати

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 - k^2}, \quad (1)$$

де  $n$  — показник заломлення.

У реальних напівпровідникових кристалах діапазон енергії, де поглинанням можна знехтувати, в більшості випадків малий. Однак умова  $n^2 \gg k^2$  виконується в значно більшому діапазоні, тому визначення показника заломлення  $n$  на основі формули для коефіцієнта відбивання неполяризованого випромінювання (за кута падіння, близького до нормального)

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (2)$$

дає достатньо надійне значення  $n$  в широкому інтервалі енергії фотонів (у всякому випадку, для  $\hbar\omega < E_g$ ).

Показник поглинання  $k$  пов'язаний з коефіцієнтом поглинання  $\alpha$  формулою  $\alpha = 4\pi k/\lambda$ . Значення  $\alpha$  можна отримати з формули для обчислення коефіцієнта пропускання  $t$  пластини, яка за умови  $n^2 \gg k^2$  виглядає наступним чином:

$$t = \frac{(1-R)^2 \left(1 + \left[\lambda\alpha / (4\pi n)\right]^2\right)}{e^{\alpha d} - R^2 e^{-\alpha d}}, \quad (3)$$

де  $d$  — товщина досліджуваного зразка.

Оскільки  $n^2 \gg k^2$ , виконується нерівність  $\alpha\lambda / (4\pi n) < 1$ , і в області зміни  $t$  від  $(1-R)/(1+R)$  до 0,1 коефіцієнт пропускання можна вираховувати як

$$t = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha d)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha d)}, \quad (4)$$

де

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[ \frac{(1-R)^2}{2t} + \sqrt{\frac{(1-R)^4}{4t^2} + R^2} \right]. \quad (5)$$

У нашому випадку  $t < 0,1$ , тому цю формулу можна спростити до

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{(1-R)^2}{t}. \quad (6)$$

Таким чином, для визначення  $\alpha$  необхідно провести вимірювання величин  $t$  та  $R$ .

Похибки отримання коефіцієнта поглинання проаналізовано в багатьох роботах, з яких впливає, що основна похибка одержується в процесі вимірювання  $t$  та  $R$ , а також визначення товщини зразка. Врахування цих похибок дає сумарну величину біля 15% за абсолютною величиною.

В [13] показано, що формула (5) є справедливою не лише для об'ємних матеріалів, а й для плівок, нанесених на прозорі підкладки, і єдине, що обмежує її використання, є вимога виконання умови  $ad \gg 1$ . Для тонких плівок вона виконується в області краю власного поглинання.

Для одержання спектра порівняння проводили вимірювання спектра інтенсивності світла, що проходить через віконця вакуумованого кріостата, за відсутності зразка за кімнатної температури.

Залежність коефіцієнта пропускання від довжини хвилі електромагнітного випромінювання представлено на **рис. 1**. На цих спектрах спостерігається інтерференційна картинка. Зазначимо, що зміна абсолютної величини  $t$  зі зміною температури, на наш погляд, пояснюється утворенням на вікнах кріостату конденсату, що зменшує коефіцієнт пропускання.

Отримані результати вимірювань коефіцієнтів пропускання та відбивання досліджуваних зразків були використані для отримання коефіцієнта поглинання  $\alpha$ .

Одержані залежності  $\alpha = f(h\nu)$  були перераховані в залежності  $\alpha^2 = f(h\nu)$ , які дали можливість визначити ширину забороненої зони  $E_g$  зразка для кожної досліджуваної температури

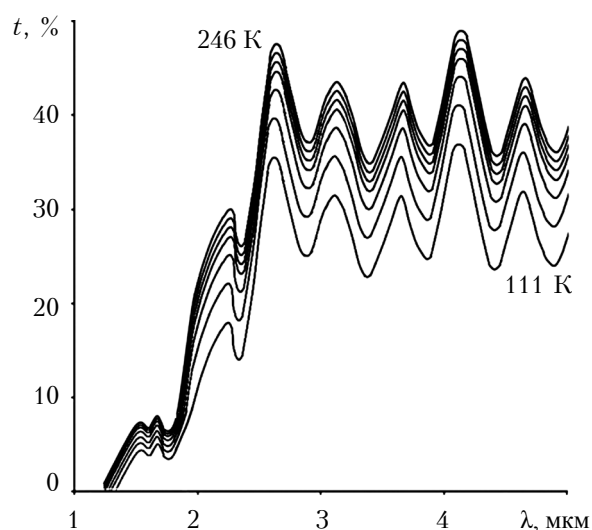


Рис. 1. Спектри коефіцієнта пропускання зразка тонкої плівки  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , отримані за температури від 111 до 246 К (проміжні значення: 114; 130,5; 148; 169; 201 К)

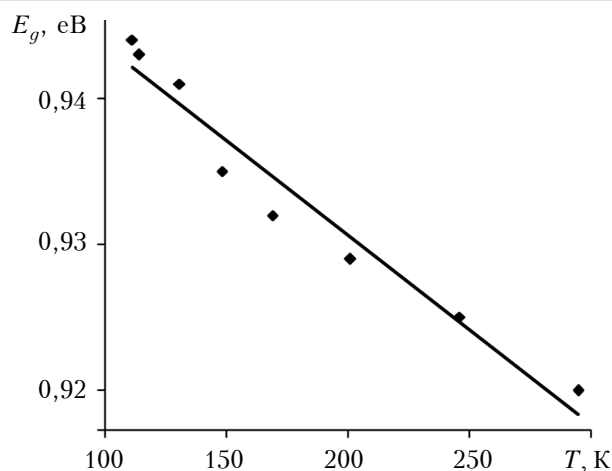


Рис. 2. Температурна залежність ширини забороненої зони зразка тонкої плівки  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$

та побудувати графік, представлений на **рис. 2**. Як видно, ширина забороненої зони досліджуваної напівпровідникової плівки зменшується при підвищенні температури. Таку поведінку можна пояснити тим, що у зв'язку із збільшенням теплової енергії зростає амплітуда коливань атомів, що призводить до збільшення між-атомної відстані, а значить, до зменшення енергії зв'язку в матеріалі і, відповідно, ширини забороненої зони.

З рис. 2 також було визначено температурний коефіцієнт ширини оптичної забороненої зони, який склав  $-1,29 \cdot 10^{-4}$  eV/K.

### Висновки

Дослідження оптичних коефіцієнтів тонких плівок  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , отриманих методом високочастотного магнетронного напылення попередньо синтезованого матеріалу на скляні підкладки, показали, що в зразках спостерігаються прямі міжзонні оптичні переходи з оптичною шириною забороненої зони 0,92 eV за кімнатної температури. Отримане значення її температурного коефіцієнта становить  $-1,29 \cdot 10^{-4}$  eV/K, тобто оптична ширина забороненої зони зменшується із температурою, що є характерним для класичних напівпровідників.

### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Maistruk E. V., Koziarskyi I. P., Koziarskyi D. P., Andrushchak G. O. Optical properties of thin films CZTSe produced by RF magnetron sputtering and thermal evaporation // IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP). — 2017. — Vol. CFP17F65-ART, 01PCSI28. — <https://doi.org/10.1109/NAP.2017.8190163>
2. Maistruk E. V., Koziarskyi I. P., Koziarskyi D. P. et al. Structure and optical properties of thin films CZTS obtained by the RF magnetron sputtering // Proc. SPIE 10612, Thirteenth International Conference on Correlation Optics. — 2018. — 1061215. — <https://doi.org/10.1117/12.2304801>
3. Козьярський І. П., Майструк Э. В., Козьярський Д. П., Марьянчук П. Д. Электрические свойства тонких пленок

$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  и  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_2\text{Te}_2(\text{S}_2)$ , полученных методом термовакuumного напыления // Журнал нано- та електронної фізики. — 2018. — Т. 10. № 1. — С. 01028. — [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(1\).01028](https://doi.org/10.21272/jnep.10(1).01028)

4. Pawar S. M., Inamdar A. I., Pawar B. S. et al. Synthesis of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) absorber by rapid thermal processing (RTP) sulfurization of stacked metallic precursor films for solar cell applications // Materials Letters. — 2014. — Vol. 118. — P. 76–79. — <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.12.047>

5. Adelifard M., Torkamani R. Spray deposited  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  nanostructured absorber layer: a promising candidate for solar cell applications // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. — 2015. — Vol. 26, iss. 6. — P. 3700–3706. — <https://doi.org/10.1007/s10854-015-2888-4>

6. Cui Y., Deng R., Wang G. et al. A general strategy for synthesis of quaternary semiconductor  $\text{Cu}_2\text{MSnS}_4$  ( $\text{M} = \text{Co}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Ni}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ ) nanocrystals // J. Mater. Chem. — 2012. — Vol. 22. — P. 23136–23140. — <https://doi.org/10.1039/C2JM33574C>

7. Xin H., Katahara J. K., Braly I. L., Hillhouse H. W. 8% Efficient  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$  Solar Cells from Redox Equilibrated Simple Precursors in DMSO // Adv. Energy Mater. — 2014. — Vol. 4(11). — <https://doi.org/10.1002/aenm.201301823>

8. Yu X., Ren A., Wang F. et al., Synthesis and characterization of CZTS thin films by sol-gel method without sulfurization // International Journal of Photoenergy. —

2014. — Vol. 2014. — Article ID 861249. — <https://doi.org/10.1155/2014/861249>

9. Tanaka K., Fukui Y., Moritake N., Uchiki H. Chemical composition dependence of morphological and optical properties of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  thin films deposited by sol-gel sulfurization and  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  thin film solar cell efficiency // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. — 2011. — Vol. 95, iss. 3. — P. 838–842. — <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.10.031>

10. Cooper C. S., Arnou P., Wright L. D. An innovative approach for fabrication of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  absorber layers using solutions of elemental metal powders // Thin Solid Films. — 2017. — Vol. 633. — P. 151–155. — <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.12.026>

11. Уханов Ю. И. Оптические свойства полупроводников // Москва: Наука, 1978.

12. Kozarskyi I. P., Marianchuk P. D., Maistruk E. V. Optical properties of  $(3\text{HgSe})_{0.5}(\text{In}_2\text{Se}_3)_{0.5}$  crystals doped with Mn or Fe // Ukr.J.Phys.Opt. — 2011. — Vol. 12. — P. 137–142. — <https://doi.org/10.3116/16091833/12/3/137/2011>

13. Maistruk E. V., Mar'yanchuk P. D., Solovan M. N. et al. Optical properties of thin  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  films produced by RF magnetron sputtering // Optics and Spectroscopy. — 2017. — Vol. 123, №1. — P. 38–43. — <https://doi.org/10.1134/S0030400X17070153>

Дата надходження рукопису  
в редакцію 01.10 2018 р.

Э. В. МАЙСТРУК, И. П. КОЗЯРСКИЙ,  
Д. П. КОЗЯРСКИЙ, П. Д. МАРЬЯНЧУК

Украина, Черновицкий национальный университет  
имени Юрия Федьковича  
E-mail: d.kozarskyi@chnu.edu.ua

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$

*Использование солнечных элементов в различных областях науки и техники способствует развитию материаловедения и научной деятельности в этой сфере. В последнее время ученые занимаются исследованием оптических и электрических свойств таких материалов, как кастериты. Кастерит является природным минералом, который состоит в основном из меди, цинка, олова, серы и селена, то есть достаточно широко распространенных в природе элементов. Поэтому и солнечные элементы, разработанные на основе кастерита, будут иметь, по мнению исследователей, низкую стоимость. Кроме того, кастериты относятся к прямозонным полупроводникам с величиной запрещенной зоны 0,9–1,5 эВ и с большим коэффициентом оптического поглощения ( $\approx 10^4 \text{ см}^{-1}$ ).*

*В данной работе исследовано влияние температуры на оптические свойства тонких пленок кастеритов  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ , полученных методом ВЧ-магнетронного напыления синтезированного ранее материала на стеклянные подложки.*

*Оптические коэффициенты определяли методом, основанным на независимом измерении коэффициентов отражения и пропускания. Коэффициент отражения исследовали при комнатной температуре, коэффициент пропускания — в температурном диапазоне 111–290 К. Измерения проводили в диапазоне длины волны от 0,9 до 26 мкм. Полученные данные были использованы для расчета коэффициента поглощения и ширины запрещенной зоны образцов при различных температурах из исследуемого диапазона. Исследования показали, что в пленках  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  наблюдаются прямые межзонные оптические переходы. Оптическая ширина запрещенной зоны при комнатной температуре составила 0,92 эВ при температурном коэффициенте  $-1,29 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$ , то есть оптическая ширина запрещенной зоны уменьшается с температурой, что характерно для классических полупроводников.*

*Ключевые слова: тонкие пленки, CZTSe, оптические коэффициенты, температурный коэффициент ширины запрещенной зоны.*

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON OPTICAL PROPERTIES  
OF THIN FILMS  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ 

The use of solar cells in various fields of science and technology contributes to the development of materials science and scientific activity in this area. Recently, scientists have been researching the optical and electrical properties of materials such as custerite. Custerite is a natural mineral which consists mainly of copper, zinc, tin, sulfur and selenium, that is, elements that are fairly widespread in nature. Therefore, solar cells, developed on the basis of custerite, will have, according to the researchers, a low cost. In addition, custerites belong to direct-gap semiconductors with a band gap of 0.9–1.5 eV and with a large optical absorption coefficient ( $\approx 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ).

In this work, the authors investigate the effect of temperature on the optical properties of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  thin films of custerite obtained by the method of RF magnetron sputtering of previously synthesized material on glass substrates.

Optical coefficients were determined by a method based on independent measurement of reflection and transmission coefficients. The reflection coefficient was studied at room temperature, and the transmittance – in the temperature range of 111–290 K. The measurements were made in the wavelength range from 0.9 to 26  $\mu\text{m}$ . The obtained data were used to calculate the absorption coefficient and the band gap of the samples at different temperatures from the range under study. Studies have shown that direct interband optical transitions are observed in  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  films. The optical band gap at room temperature was 0.92 eV at a temperature coefficient of  $-1.29 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$ , that is, the optical band gap decreases with temperature, which is typical of classical semiconductors.

**Keywords:** thin films, CZTS, optical coefficients, temperature coefficient of the optical band gap.

## REFERENCES

1. Maistruk E. V., Koziarskyi I. P., Koziarskyi D. P., Andrushchak G. O. Optical properties of thin films CZTSe produced by RF magnetron sputtering and thermal evaporation. *IEEE 7<sup>th</sup> International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP)*, 2017, vol. CFP17F65-ART, 01PCS128. <https://doi.org/10.1109/NAP.2017.8190163>
2. Maistruk E. V., Koziarskyi I. P., Koziarskyi D. P. et al. Structure and optical properties of thin films CZTS obtained by the RF magnetron sputtering. *Proc. SPIE 10612, Thirteenth International Conference on Correlation Optics*, 2018, 1061215. <https://doi.org/10.1117/12.2304801>
3. Koziarskyi I. P., Maistruk E. V., Koziarskyi D. P., Maryanchuk P. D. Electric properties of thin films  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  and  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_2\text{Te}_2$  ( $\text{S}_2$ ) obtained by thermal vacuum deposition. *Zhurnal nano- ta elektronnoyi fizyky*. 2018, vol. 10, no. 1, pp. 01028. (Ukr) [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(1\).01028](https://doi.org/10.21272/jnep.10(1).01028)
4. Pawar S. M., Inamdar A. I., Pawar B. S. et al. Synthesis of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) absorber by rapid thermal processing (RTP) sulfurization of stacked metallic precursor films for solar cell applications. *Materials Letters*, 2014, vol. 118, pp. 76–79. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.12.047>
5. Adelifard M., Torkamani R. Spray deposited  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  nanostructured absorber layer: a promising candidate for solar cell applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, vol. 26, iss. 6, pp. 3700–3706. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-2888-4>
6. Cui Y., Deng R., Wang G. et al. A general strategy for synthesis of quaternary semiconductor  $\text{Cu}_2\text{MSnS}_4$  ( $\text{M} = \text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ) nanocrystals. *J. Mater. Chem*, 2012, vol. 22, pp. 23136–23140. <https://doi.org/10.1039/C2JM33574C>
7. Xin Hao, Katahara J. K., Braly I. L., Hillhouse H. W. 8% Efficient  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$  solar cells from redox equilibrated simple precursors in DMSO. *Adv. Energy Mater*, 2014, vol. 4(11). <https://doi.org/10.1002/aenm.201301823>
8. Yu X., Ren A., Wang F. Synthesis and Characterization of CZTS Thin Films by Sol-Gel Method without Sulfurization. *International Journal of Photoenergy*, 2014, vol. 2014, article ID 861249. <https://doi.org/10.1155/2014/861249>
9. Tanaka K., Fukui Y., Moritake N., Uchiki H. Chemical composition dependence of morphological and optical properties of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  thin films deposited by sol-gel sulfurization and  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  thin film solar cell efficiency. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2011, vol. 95, iss. 3, pp. 838–842. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.10.031>
10. Cooper C. S., Arnou P., Wright L. D. An innovative approach for fabrication of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  absorber layers using solutions of elemental metal powders. *Thin Solid Films*, 2017, vol. 633, pp. 151–155. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.12.026>
11. Ukhonov Yu. I. *Opticheskiye svoystva poluprovodnikov* [Optical properties of semiconductors]. Moscow, Nauka, 1978. (Rus)
12. Koziarskyi I. P., Maryanchuk P. D., Maistruk E. V. Optical properties of  $(3\text{HgSe})_{0.5}(\text{In}_2\text{Se}_3)_{0.5}$  crystals doped with Mn or Fe. *Ukr. J. Phys. Opt*, 2011, vol. 12, pp. 137–142. <https://doi.org/10.3116/16091833/12/3/137/2011>
13. Maistruk E. V., Maryanchuk P. D., Solovan M. N. et al. Optical properties of thin  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  films produced by RF magnetron sputtering. *Optics and Spectroscopy*, 2017, vol. 123, no. 1, pp. 38–43. <https://doi.org/10.1134/S0030400X17070153>

## Опис статті для цитування:

Майструк Е. В., Козіарський І. П., Козіарський Д. П., Мар'янчук П. Д. Вплив температури на оптичні властивості тонких плівок  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ . *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2018, № 5-6, с. 50–54. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.50>

## Cite the article as:

Maistruk E. V., Koziarskyi I. P., Koziarskyi D. P., Maryanchuk P. D. Influence of temperature on optical properties of thin films  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ . *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 5-6, pp. 50-54. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.50>



## РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

*Горюх Геннадій Георгійович*, канд. техн. наук, зав. науково-дослідницької лабораторії, Білоруський державний університет інформатики і радіоелектроніки, м. Мінськ

*Despotović Vladimir*, Ph.D., Associate Professor, University of Belgrade, Technical Faculty in Bor

*Должиков Володимир Васильович*, докт. фіз.-мат. наук, зав. кафедрою, Харківський національний університет радіоелектроніки

*Короткий Євген Васильович*, канд. техн. наук, старший викладач, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Nika Denis*, Ph.D., Department Chair, Laboratory Head, Moldova State University, Chisinau

*Ніколаєнко Юрій Єгорович*, докт. техн. наук, провідний науковий співробітник, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Опанасюк Анатолій Сергійович*, докт. фіз.-мат. наук, зав. кафедри, Сумський державний університет

*Садченко Андрій Валерійович*, канд. техн. наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет

*Томашик Василь Миколайович*, докт. хім. наук, науковий секретар, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ, м. Київ

*Юхимчук Володимир Олександрович*, докт. фіз.-мат. наук, зав. відділу, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ, м. Київ

## ПАМ'ЯТКА ДЛЯ АВТОРІВ ЖУРНАЛУ «ТКЕА»

1. До розгляду приймаються статті прикладної спрямованості українською, російською або англійською мовою, що не були опубліковані раніше і не були передані для публікації в інші видання.

2. В журналі публікуються науково-практичні та експериментальні роботи з наступних тематичних напрямків:

- Сучасні електронні технології;
- Нові компоненти для електронної апаратури;
- Електронні засоби: дослідження, розробки;
- НВЧ-техніка;
- Системи передачі та обробки сигналів;
- Мікропроцесорні пристрої та системи;
- Енергетична електроніка;
- Напівпровідникова світлотехніка;
- Біомедична електроніка;
- Сенсоелектроніка;
- Функціональна мікро- та наноелектроніка;
- Забезпечення теплових режимів;
- Технологічні процеси та обладнання;
- Матеріали електроніки;
- Метрологія. Стандартизація.

3. Усі матеріали, які надходять до редакції, піддаються двосторонньому рецензуванню.

4. У разі виявлення плагіату або фальсифікації результатів стаття відхиляється.

5. Редакція не стягує плату за опублікування рукопису та не виплачує авторський гонорар.

6. Обов'язковою умовою для прийняття статті до розгляду є її відповідність загальноприйнятим нормам побудови наукової публікації, тобто в ній мають бути:

— опис проблеми з аналізом публікацій за останні 5 років та обґрунтуванням необхідності проведення дослідження;

— чітко сформульована мета роботи;

— основна частина з обговоренням та інтерпретацією результатів;

— висновки.

Крім цього, редакцію цікавлять наступні аспекти:

— можливість практичного використання результатів досліджень;

— доцільність таблиць, ілюстрацій, у т. ч. відсутність дублювання наведеної в них інформації;

— адекватність використання літературних джерел;

- точність термінології;
- композиція рукопису, у т. ч. виправданість обсягу.

7. Готуючи статтю, слід звернути увагу на наступне:

- назва, мета роботи та висновки мають бути узгоджені між собою;
- назва має бути чіткою, інформативною і водночас по можливості короткою;
- ключові слова підбираються так, щоб ймовірність знаходження статті через пошукові системи була якомога вищою;
- анотація на початку статті має бути досить лаконічною (до 100 слів), демонструвати, що зроблено у роботі, а також містити усі наведені ключові слова;
- вступ знайомить читача з областю досліджень, існуючими в ній проблемами, показує актуальність проведення даного дослідження і закінчується чітко сформульованою метою роботи. Тут необхідно привести огляд літератури за даною тематикою, вказавши на проблеми, які потребують додаткового дослідження і які вирішуються в даній роботі;
- основна частина може містити такі розділи, як «Зразки для досліджень», «Методика досліджень», «Результати досліджень і їх обговорення» та ін. Опис результатів, представлених на рисунках, має містити інтерпретацію цієї інформації, а не зводитися до дублювання підписів під рисунками або до простого опису наведених залежностей. Наприклад, замість таких неінформативних фраз, як «На рис. 1 наведено графік залежності  $A$  від  $B$ . З рисунка видно, що при зростанні  $B$  значення  $A$  монотонно зменшується.», слід дати пояснення типу «Як видно з рис. 1, при зростанні  $B$  значення  $A$  монотонно зменшується, що свідчить про те, що ... »;
- висновки не мають повторювати анотацію — тут потрібно показати, що заявлену мету досягнуто, навести результати роботи та рекомендації щодо їх практичного використання, а також визначити основні напрямки подальших досліджень. Правильно сформулювати висновки допоможуть такі фрази як «Проведене дослідження показало, що ...», «Авторами встановлено, що ...», «Розроблена методика дозволяє ...» тощо.

8. Список «Використані джерела» формується в порядку їх згадування в тексті та оформляється відповідно до наведених нижче вимог. При цьому потрібно мати на увазі наступне:

- не менше половини загальної кількості джерел мають становити статті та монографії, опубліковані за останні п'ять років (до 10 джерел);
- кількість посилань на власні роботи має бути не вище за 25—30% від загальної кількості цитованих джерел;
- не рекомендується включати до списку літератури посилання на нормативні документи (якщо без цього не можна обійтися, краще згадати їх безпосередньо в тексті статті);
- при посиланні у тексті на числові значення, формули та інші фактичні дані, запозичені з книг, слід вказувати не тільки саму книгу, але і сторінку (наприклад, [2, с. 418]).

9. Після статті потрібно привести тематичну інформацію — назву, ПІБ авторів, місце роботи, анотацію і ключові слова — українською, англійською та російською мовами. При цьому перекладні варіанти анотації мають бути представлені в розширеному вигляді (200—250 слів) і відображати всі структурні розділи (актуальність теми, постановку задачі, опис рішення, висновки та практичну значущість).

10. Редакція не ставить жорстких вимог до обсягу статті — головне, щоб він був виправданий. Як правило, тексти статей в «ТКЕА» займають від трьох до шести журнальних сторінок, що відповідає 7—15 сторінкам, набраним у текстовому редакторі Microsoft Word, шрифт Times New Roman, розмір 12, міжрядковий інтервал 1,5.

11. Набір складних формул, а також спеціальних знаків над літерними позначеннями, підкоренових виразів, меж інтегрування, підсумовування тощо необхідно виконувати у програмах типу MathType (не можна користуватися вбудованим у Word формульним редактором), а в решті випадків (прості формули, шрифтові виділення, під/надрядкові індекси тощо) використовувати тільки звичайні засоби Word.

12. Одиниці виміру всіх величин мають відповідати сучасним вимогам, а термінологія — загальноприйнятій. Всі використані символи та аббревіатури потрібно пояснити при першому їх згадуванні у тексті.

13. Бажано, щоб обсяг ілюстрацій не перевищував 40% від загального обсягу статті.

14. На початку статті, крім її назви та інформації про авторів (ПІБ, вчені ступені, місце роботи, e-mail), необхідно вказати індекс за Універсальною десятиковою класифікацією (УДК).

15. Матеріали статті разом з Авторською угодою та Карткою автора надсилаються до редакції на e-mail <tkea@optima.com.ua>. У тексті супроводжувального листа необхідно вказати ПІБ авторів, назву статті та відповідний тематичний напрямок (див. п. 2).

16. Для цитування статей з журналу «ТКЕА» латинкою слід використовувати його транслітеровану назву, а саме «Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature».

P.s. Для контролю виконання вимог щодо змісту статті автори можуть скористатися критеріями, за якими рукопис буде оцінюватися рецензентом (див. бланк рецензії на сайті).

---

Підписано до друку 28.12 2018 р. Формат 60×84 1/8. Друк. арк. 8,0. Тираж 100 прим. Зам. № 15  
Оригінал-макет виготовлено в видавництві «Політехперіодика»  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3232 від 09.07.2008 р.  
(65044, м. Одеса, а/с 17)  
Надруковано ФОП Побута М. І. з готового оригінал-макету  
(65044, м. Одеса, пр-т. Шевченка, 1а)

