

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

ДВАДЦАТЬ ПЕРША МІЖНАРОДНА
НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ



**СУЧАСНІ
ІНФОРМАЦІЙНІ
ТА ЕЛЕКТРОННІ
ТЕХНОЛОГІЇ**

**25—29 травня 2020 року
Україна, м. Одеса**

Реквізити для зв'язку
e-mail <tkea.journal@gmail.com>
тел. +38 099 444 63 52

- Інформаційні технології та захист інформації в електроніці та телекомунікації
- Радіотехнічні, телекомунікаційні та телевізійні системи
- Проектування, конструювання, виробництво та контроль електронних засобів
- Функціональна електроніка. Мікро- та нанотехнології



www.tkea.com.ua/siet/inf.html

5—6 2019

СЕНТЯБРЬ — ДЕКАБРЬ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
«ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ»

ISSN 2225-5818

Виходить один раз в 2 місяця

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

К. т. н. О. Ф. Бондаренко
(КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна)

РЕДАКЦІЙНА РАДА

Акад. НАНУ, д. ф.-м. н. О. Є. Беляєв (м. Київ, Україна)
Д. т. н. М. М. Ваків (м. Львів, Україна)
Д. т. н. Г. О. Оборський (м. Одеса, Україна)
К. т. н. В. М. Чміль (м. Київ, Україна)
О. А. Тихонова (м. Одеса, Україна)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Д. т. н. С. Г. Антошук (м. Одеса, Україна)
Д. т. н. А. П. Бондарев (м. Львів, Україна)
Prof. I. Vajda (Budapest, Hungary)
Prof. D. Vinnikov (Tallinn, Estonia)
Prof. I. Galkin (Riga, Latvia)
К. т. н. Е. М. Глушеченко (м. Київ, Україна),
зам. головного редактора
К. т. н. Г. Г. Горох (м. Мінськ, Республіка Білорусь)
Prof. K. Dhoska (Tirana, Albania)
Д. ф.-м. н. В. В. Должиков (м. Харків, Україна)
Д. т. н. А. О. Дружинін (м. Львів, Україна)
Д. т. н. А. А. Єфіменко (м. Одеса, Україна),
заст. головного редактора
Д. ф.-м. н. Д. В. Корбутяк (м. Київ, Україна)
Д. т. н. С. І. Круковський (м. Львів, Україна)
Чл.-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. В. С. Лисенко (м. Київ, Україна)
Prof. J. Martins (Caparica, Portugal)

Д. т. н. І. Ш. Невлюдов (м. Харків, Україна)
Dr. Sc. D. Nika (Chisinau, Moldova)
Д. т. н. Ю. Є. Ніколаєнко (м. Київ, Україна)
Prof. V. Pires (Setúbal, Portugal)
Д. ф.-м. н. С. В. Плаксін (м. Дніпро, Україна)
К. т. н. Прокопєць В. М. (м. Київ, Україна)
Prof. E. Romero-Cadaval (Badajoz, Spain)
К. ф.-м. н. О. В. Рибка (м. Харків, Україна)
К. т. н. П. С. Сафронов (м. Одеса, Україна),
відп. секретар редколегії
Д. т. н. В. М. Сидорець (м. Київ, Україна)
Д. т. н. В. С. Ситніков (м. Одеса, Україна)
К. т. н. С. А. Степенко (м. Чернігів, Україна)
Dr. Sc. Z. Stević (Belgrade, Serbia)
Д. х. н. В. М. Томашик (м. Київ, Україна)
К. т. н. В. Є. Трофімов (м. Одеса, Україна)

В редакції можна оформити передплату на журнал або придбати будь-який номер

Контактна інформація

Україна, 65044, м. Одеса, а/с 17;
tkea.journal@gmail.com, www.tkea.com.ua,
+38 099 444 63 52.

Редакція

О. А. Тихонова, А. А. Єфіменко, П. С. Сафронов,
О. О. Алексєєва, М. Г. Глава, Н. М. Колганова, Є. І. Корецька.

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 23.12.2019 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 «Политехперіодика»

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

СОДЕРЖАНИЕ

Электронные средства: исследования, разработки

Измерительная система для тестирования элек-
трических параметров ПЗСЭУ разного формата.
*В. В. Забудский, А. Г. Голенков, О. В. Рихальский,
В. П. Рева, С. В. Коринец, С. Е. Духнин, Р. И.
Митяй* (на английском) 3

Исследование возможностей компенсации эффек-
та блуминга ПЗС-детекторов оптического спектра.
*А. Д. Егоров, В. А. Егоров, С. А. Егоров, И. Е.
Синельников* (на украинском) 8

СВЧ-техника

Учет взаимного влияния отдельных микрополо-
сковых элементов на параметры антенных решеток
К. Prahlada Rao, R. M. Vani, P. V. Hunagund (на
английском) 16

Обеспечение тепловых режимов

Синтез структуры решателя системы математиче-
ского моделирования OpenFOAM для анализа те-
пловых режимов светодиодного светильника. *И. В.
Собянин, В. Е. Трофимов* 25

Новая конструкция светодиодного светильника с те-
пловыми трубами. *Д. В. Пекур, Ю. Е. Николаенко,
В. М. Сорокин* (на украинском) 34

Материалы электроники

Влияние примесей и структурных дефектов на элек-
трофизические и детекторные свойства CdTe и
CdZnTe. *А. И. Кондрик, Г. П. Ковтун* 43

Технологические процессы и оборудование

Согласование параметров сварочных импульсов с
программой давления электродов и электрофизи-
ческими процессами в сварочном контакте. *А. Ф.
Бондаренко* (на украинском) 51

Рецензенты номера 60

Новые книги 15

ЗМІСТ

Електронні засоби: дослідження, розробки

Вимірювальна система для тестування електричних параметрів ПЗЗЕМ різного формату. *В. В. Забудський, О. Г. Голенков, О. В. Рихальський, В. П. Рева, С. В. Корінець, С. Є. Духнін, Р. І. Митяй* (3)

Дослідження можливостей компенсації ефекта блумінга ПЗЗ-детекторів оптичного спектру. *А. Д. Єгоров, В. А. Єгоров, С. А. Єгоров, І. Є. Сінельников* (8)

НВЧ-техніка

Врахування взаємного впливу окремих мікросмушкових елементів на параметри антенних решіток. *К. Prahlada Rao, R. M. Vani, P. V. Hunagund* (16)

Забезпечення теплових режимів

Синтез структури вирішувача системи математичного моделювання OpenFOAM для аналізу теплового режиму світлодіодного світильника. *І. В. Собянін, В. Є. Трофімов* (25)

Нова конструкція світлодіодного світильника з тепловими трубами. *Д. В. Пекур, Ю. Є. Ніколаєнко, В. М. Сорокін* (34)

Матеріали електроніки

Вплив домішок і структурних дефектів на електрофізичні та детекторні властивості CdTe та CdZnTe. *О. І. Кондрик, Г. П. Ковтун* (43)

Технологічні процеси та обладнання

Узгодження параметрів зварювальних імпульсів з електрофізичними процесами в зварювальному контакті та програмою тиску електродів. *О. Ф. Бондаренко* (51)

CONTENTS

Electronic devices: research, development

Measuring system for testing electrical parameters of EMCCDs of various formats. *V. Zabudsky, O. Golenkov, O. Rikhalsky, V. Reva, S. Korinets, S. Dukhnin, R. Mytaii* (3)

Investigation of the possibility to compensate for the blooming effect in CCD optical spectral sensors. *A. D. Yegorov, V. A. Yegorov, S. A. Yegorov, I. E. Sinelnikov* (8)

Microwave engineering

Mitigation of mutual coupling in microstrip antenna arrays. *K. Prahlada Rao, R. M. Vani, P. V. Hunagund* (16)

Thermal management

Synthesising solver structure of the OpenFOAM mathematical modeling system for analysing thermal mode of LED lamps. *I. V. Sobyenin, V. E. Trofimov* (25)

New LED lamp design with heat pipes. *D. V. Pekur, Yu. E. Nikolaenko, V. M. Sorokin* (34)

Materials of electronics

Influence of impurities and structural defects on electrophysical and detector properties of CdTe and CdZnTe. *A. I. Kondrik, G. P. Kovtun* (43)

Production technology and equipment

Coordination of welding pulse parameters with electrode pressure program and electrophysical processes in welding contact. *O. F. Bondarenko* (51)

*Ph.D. V. ZABUDSKY¹, Ph.D. O. GOLENKOV¹, O. RIKHALSKY²,
Ph.D. V. REVA¹, S. KORINETS¹, S. DUKHNIN¹, R. MYTIAI*

Ukraine, Kyiv, ¹Institute of Semiconductor Physics of NASU,

²Bogomolets Institute of Physiology of NASU

E-mail: zvv1968@yahoo.com

MEASURING SYSTEM FOR TESTING ELECTRICAL PARAMETERS OF EMCCDs OF VARIOUS FORMATS

This article describes the developed equipment that allows measuring the photoelectrical parameters of multielement photodetectors, specifically various formats of EMCCD (electron multiplying charge-coupled device) chips. The authors present the measuring techniques and test results on dark currents, output amplifier sensitivity, charge transfer efficiency, charge capacity and other parameters. The studies were conducted, both on the wafer and in the body, on samples of the following formats: 576×288, 640×512, 768×576, 1024×1024, and 1280×1024.

Keywords: photodetectors, EM CCD, electron multiplying charge-coupled device, measuring system, photoelectric parameters.

An electron multiplying CCD (**EMCCD**) is a special type of CCD detector. EMCCDs are highly sensitive instruments operating in the visible range that were developed for low light surveillance and detection of single photons and have been successfully used in various fields over the last two decades [1–5]. There are many different types of matrices that differ in resolution, method of information reading, illumination type – direct or backlight. The wide range of CCD array photodetectors puts forward extensive and stringent requirements for the performance of measurement systems. There is a variety of papers about testing assembled cameras and their driving circuits [6–8], but little information is found on measuring systems for separate chips on the wafer or in the body.

Any measuring system of this kind should allow for a simple adjusting of AC and DC power supply of the chip (and its timing diagrams) in order to control its operating mode, provide a possibility of testing faulty chips without a damage to the measuring system, and measure a variety of parameters for the tested chips. The invention of EMCCD matrixes called for new requirements, such as providing an increased clock frequency and voltage or generation of three-level pulse signals. In order to test the manufactured silicon chips, especially at the stage of setting the production technology, testing equipment with a certain degree of versatility and tuning capabilities is required. In this work, the authors developed testing equipment that allows performing automatic or manual detecting of defective chips and

measuring the parameters of crystals on the wafer and in the body.

Design of measuring system

The developed equipment has a master part and a measuring part. The master part allows setting 16 direct and 16 alternating voltages as listed in **Tables 1, 2**. These voltages are supplied via 48 DC-voltage channels on the base of AD5328 12-bit DAC with output amplifiers for precise setting of required voltage in the given range; sine generator based on the direct digital synthesis method; digital pattern generator based on a GigaBee XC6SLX with a minimum 1/88.88 MHz time discrete and a maximum pattern length of up to 64 MSample. The device is connected to a PC via a 100 Mbit LAN port.

Alternate voltage channels (15 V voltage swing) are made using EL7156 drivers; high voltage (50 V swing) channels are based on LM2435T drivers. Apart from that, there is also one channel with three controllable states: low, mid and high level voltages. It may be useful, for instance, during testing of interline transfer type CCDs.

Table 1

Parameters of the 16 DC channels

Channel quantity	Setting range, V	Total relative error	Noise, mV/300 kHz
8	–5...+15	typical: $\pm 0.1\%$; maximal: $\pm 0.5\%$ from V_{\max}	< 0.15
4	0...+25		< 0.40
4	0...+35		< 0.70

Table 2

Parameters of the 16 AC channels

Channel quantity	Setting range, V	Wave front, ns	Load (each channel)
4	HL, LL: -5...+10	120...200	up to 12 nF
5	HL: -5...+10 or 0...+15 LL: -5...+15 or 0...+15	< 15	220 pF
5	HL: +5 LL: 0	—	150 pF
1	HL: +5...+20; LL, ML: -5...+10 (three level signal)	120...200	up to 12 nF
1	HL: -5...+45 LL: -5...+15 (square or sine wave)	20	100 pF, 10 mA

For all alternate channels, a particular attention is paid to minimizing the distance from the drivers to the chip under study. In general, the shorter the distance the better, because of the following: firstly, the wire has a linear capacitance (low-pass filter) operating as a receiving antenna, and secondly, the wire has a linear inductance (≈ 1 nH/1 mm) causing waveform distortion and operating as a transmitting antenna. For example, inductive reactance of a 10 mm of wire is nearly 1Ω at a frequency of 20 MHz without taking into account the skin effect and the effects associated with resonance in R-L-C circuits. It limits rise and fall times of high frequency signals (**Fig. 1**).

The measuring part of the system consists of two 2-channel 14-bit ADC with a sampling rate of up to 20 MHz. Analog and digital circuits of the device are galvanically isolated to minimize the noise from the system. Each ADC channel has differential input with a range of the input signal of $\pm 0.5U_{REF}$, where U_{REF} is the reference

Table 3

Electrical parameters of EMCCD matrices that can be measured by the developed test system

Parameter	Range
Average dark signal	$> 1 e^-/\text{pixel}/s$
Multiplication gain	1 – 1000
Peak output voltage (POV)	< 1 V
Output amplifier responsivity (OAR)	$\mu V/e^-$
Electric charge transfer efficiency (CTE)	≤ 0.99995
Dark signal non-uniformity (DSNU)	—
Register charge capacity	—
White or black column quantity	—

voltage than can be coded to 1 or 2 V. ADC is plugged into a PC via high-speed USB interface. The measured noise of ADC with shorted input was about 0.35 mV.

Another part of the measuring system was a Keithley 2701 voltmeter with two 20-channel 7710 modules. It allows measuring direct current parameters of the tested chips, for example, resistance between different contact pads, current consumption on some lines, DC output amplifier specifications.

Apart from the DC parameters, the system allows measuring other characteristics of the chips, as shown in **Table 3**.

In order to make it possible to measure EMCCD chips of different formats, we used corresponding adapters from the DIP-48 output of the measuring system to the body for each type of matrix.

The adapters had incorporated in them a water-cycling cooling system with a copper heat sink plate mechanically connected with the EMCCD

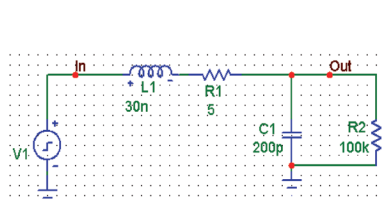


Fig. 1. Electrical diagram and the results of its simulation that illustrate the effect of inductance on the limitation of rise and fall times for high-frequency signals. Simulation was performed using 0, 20, 40, 60 nH inductances

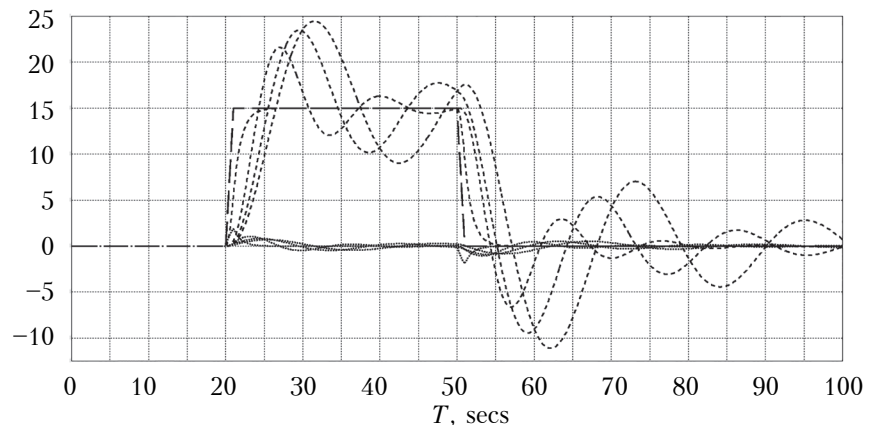


Table 4

Temperature of the chip at different values of current passing through the built-in Peltier element

Temperature, °C	Current, A
-20	1.010
-18	0.905
-15	0.780
-10	0.582
-5	0.464
0	0.357
5	0.260
10	0.173
15	0.096

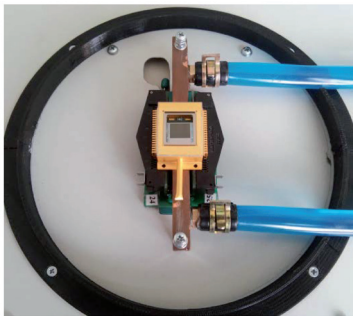
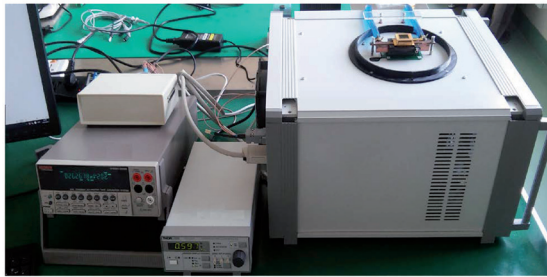


Fig. 2. Measuring system in general and an example of how a 640×512 EMCCD chip is connected to the system

body surface. TED200C temperature controller and Keithley 2701 were used to manage operating temperature of the chip with a built-in Peltier element in the $-20...+20^{\circ}\text{C}$ range (see **Table 4**). **Fig. 2** shows the test system in general and an example of how a 640×512 EMCCD chip is connected to the measuring system.

A controlled light source was located above the chip, providing uniform lighting of the matrix in the range of illumination from complete darkness to the level allowing for output signal saturation.

Measurements techniques and test examples

During the process of detecting defective crystals on the wafer or when measuring chips in the body, the parameter that should be monitored first of all is resistance between the buses. The

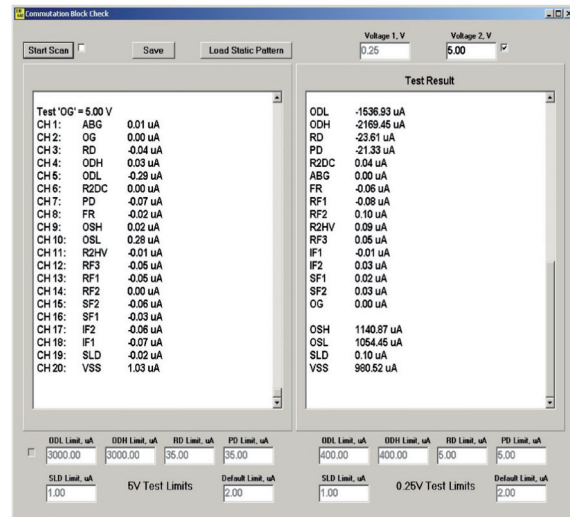


Fig. 3. Measuring of currents between different contact pads of the chip

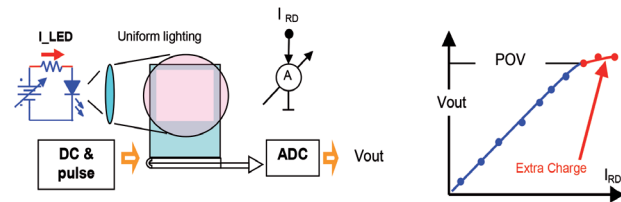


Fig. 4. Flow chart for measuring of maximum output voltage, charge capacity and output amplifier responsivity and a generalized experimental dependence

entire test of the DC parameter is divided into 2 parts: first, the current is measured at 0.25 V, and then, if the previous step is successful, at 5 V. The goal here is to prevent big currents in case of bus shortages that can cause damage to the measuring bench. **Fig. 3** shows an application window with an example of the results of the 640×512 DC test.

Other electrical parameters, such as maximum output voltage, charge capacity, output amplifier responsivity in normal and gain modes were determined using the scheme shown in **Fig. 4**. It is a chip measurement scheme with no anti-blooming function, when all currents flow through a so-called reset drain transistor, often referred to as RD. However, if antiblooming function is embedded into the chip, the output signal dependence from the RD-current does not define output signal saturation. Instead, the dependence of the output signal on the chip illumination is measured and the RD-current is measured in the saturation point.

Fig. 5 presents the test results for the 640×512 EMCCD, i.e., graphs for the volt-charge responsivity for the normal and gain modes, the average dark signal, and the dependence of gain on the R02HV voltage. Measured and calculated EMCCD parameters are shown in **Table 5**.

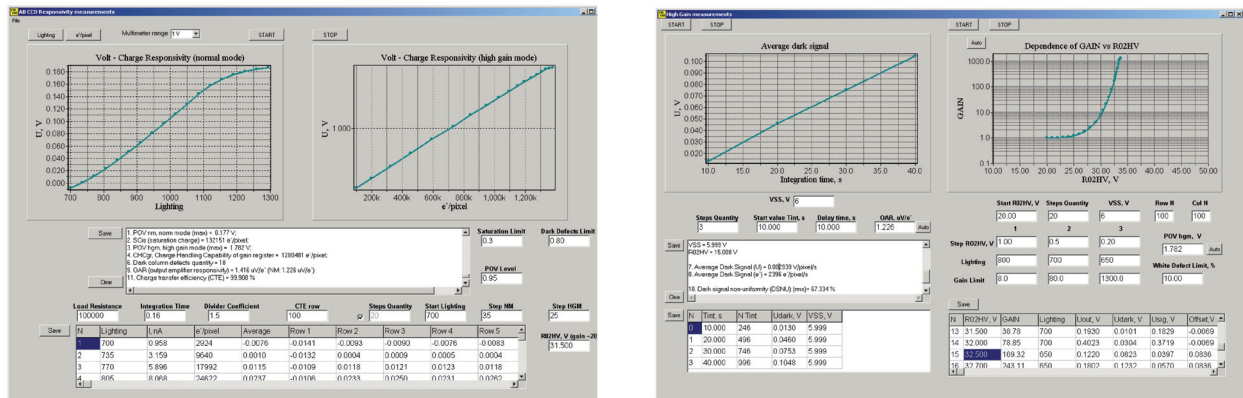


Fig. 5. Test results on the measuring system (volt-charge responsivity for normal and gain modes, average dark signal, and gain vs. R02HV voltage)

Table 5

Measured and calculated EMCCD parameters

Peak output voltage, norm mode (max)	0.177 V
Saturation charge	132151 e ⁻ /pixel
Peak output voltage, high gain mode (max)	1.782 V
Charge handling capability of gain register	1280481 e ⁻ /pixel
White column defects	3
Dark column defects quantity	18
Average dark signal	0.002939 V/pixel/s 2396 e ⁻ /pixel/s
Output amplifier responsivity	1.416 uV/e ⁻ (NM: 1.226 uV/e ⁻)
Dark signal non-uniformity (rms)	67.334%
Charge transfer efficiency	99.908%

Conclusion

The measuring system that allows measuring photoelectrical parameters of EMCCD chips of various formats has been developed. The flexible design of the measuring system allows testing different types and formats of EMCCD matrixes.

We have tested the system by measuring parameters of 576×288, 640×512, 768×576, 1024×1024, 1280×1024 matrixes both on the wafer and in the body. It has been found that the system allows detecting defective chips automatically or manually and measuring the parameters of the crystals.

REFERENCES

1. Denvir D. J., Conroy E. Electron multiplying CCD technology: the new ICCD. *Proc. SPIE*, 2002, pp. 4796. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.457779>
2. Seitz P., Theuvsen A. J. P. *Single-Photon Imaging*, Springer, 2011.
3. Daigle O., Djazovski O., Francoeur M. et al. EMCCDs: 10 MHz and beyond. *Proc. SPIE*, 9154, 91540B, 2014. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2054977>
4. Wilkins A. N., McElwain M. W., Norton T. J. et al. Characterization of a photon counting EMCCD for spacebased high contrast imaging spectroscopy of extrasolar planets. *Proc. SPIE*, 9154, 91540C, 2014. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2055346>
5. Reva V. P., Korinets S. V., Golenkov A. G. et al. [Electron Multiplication CCD Photomatrixes]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2017, no 1-2, pp. 33-37. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.1-2.33>
6. Dussault D., Hoess P. Noise performance comparison of ICCD with CCD and EMCCD cameras. *Proc. SPIE*, 5563, 2004. <http://dx.doi.org/10.1117/12.561839>
7. Soesbe T. C., Lewis M. A., Richer E. et al. Development and Evaluation of an EMCCD Based Gamma Camera for Preclinical SPECT Imaging. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, vol. 54, pp. 1516. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2007.906408>
8. Qiang Wua, Zhao-Hui Fengb and Xu-Wen Li. Design and test of an EMCCD CCD201 sensor driving circuit. *Advances in Engineering Research*, 2017, vol. 116, pp. 319.

Received 20.11 2019

Опис статті для цитування:

Zabudsky V., Golenkov O., Rikhalsky O., Reva V., Korinets S., Dukhnin S., Mytaii R. Measuring system for testing electrical parameters of EMCCDs of various formats. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2019, № 5-6, с. 3–7. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.03>

Cite the article as:

Zabudsky V., Golenkov O., Rikhalsky O., Reva V., Korinets S., Dukhnin S., Mytaii R. Measuring system for testing electrical parameters of EMCCDs of various formats. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 5-6, pp. 3-7. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.03>

DOI: 10.15222/ТКЕА2019.5-6.03
УДК 621.317.318

В. В. ЗАБУДСЬКИЙ¹, О. Г. ГОЛЕНКОВ¹,
О. В. РИХАЛЬСЬКИЙ², В. П. РЕВА¹,
С. В. КОРИНЕЦЬ¹, С. Є. ДУХНІН¹, Р. І. МИТЯЙ

Україна, м. Київ, ¹Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
²Інститут фізіології ім. О. О. Богомольця НАН України
E-mail: zvv1968@yahoo.com

ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЗЗЕМ РІЗНОГО ФОРМАТУ

Прилади з зарядовим зв'язком (ПЗЗ) з електронним множенням (ЕМ) — це високочутливі детектори видимого діапазону, що були розроблені для спостереження в умовах слабкої освітленості та реєстрації одиничних фотонів і успішно використовуються у різних сферах протягом останніх двох десятиліть. Існує багато різних типів матриць, що відрізняються роздільністю, способом зчитування інформації, прямим або зворотнім засвічуванням. Велика кількість типів ПЗЗ-фотодетекторів висуває підвищені вимоги до проектування вимірювальних систем. В літературі досить часто описуються процеси проектування та тестування готових камер, але бракує інформації щодо вимірювальних систем для тестування окремих мікросхем ПЗЗ на пластині або в корпусі.

В будь-якому разі вимірювальна система повинна надавати можливості для швидкого регулювання постійних і змінних напруг живлення чипу (та їхніх часових діаграм) для коректування режиму його роботи, передбачати ймовірність тестування несправних мікросхем і при цьому уникати пошкодження апаратури, а також вимірювати різноманітні параметри досліджуваних зразків. Крім цього, розвиток технологій ПЗЗ також призводить до появи нових вимог, наприклад підвищеної частоти тактових імпульсів та їхньої напруги, генерації трирівневих імпульсних сигналів. Для тестування виготовлених кремнієвих мікросхем, особливо на етапі впровадження технології виробництва, необхідне обладнання з певним ступенем універсальності та можливостей налаштування.

В даній статті описано розроблену вимірювальну систему, що дозволяє досліджувати фотоелектричні параметри багатовіселектних фотоприймачів, зокрема ПЗЗЕМ різних форматів. Представлено методики та результати вимірювань темнових струмів, чутливості вихідного підсилювача, ефективності передачі заряду, зарядової ємності та інших параметрів. Дослідження проводилися на зразках формату 576×288, 640×512, 768×576, 1024×1024, 1280×1024 як на пластинах, так і в корпусах.

Розроблений випробувальний стенд дозволяє проводити автоматичне або ручне відбраковування мікросхем і вимірювати фотоелектричні параметри кристалів на пластинах і в корпусі. Принцип побудови вимірювальної системи дозволяє використовувати її для дослідження матриць ПЗЗЕМ різних типів та форматів.

Ключові слова: фотодетектори, прилади з зарядовим зв'язком з електронним множенням, вимірювальна система, фотоелектричні параметри.

DOI: 10.15222/ТКЕА2019.5-6.03
УДК 621.317.318

В. В. ЗАБУДСКИЙ¹, А. Г. ГОЛЕНКОВ¹,
О. В. РИХАЛЬСКИЙ², В. П. РЕВА¹,
С. В. КОРИНЕЦЬ¹, С. Е. ДУХНИН¹, Р. И. МИТЯЙ

Украина, г. Киев, ¹Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарьова НАН Украины,
²Институт физиологии им. А. А. Богомольца НАН Украины
E-mail: zvv1968@yahoo.com

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЗСЭУ РАЗНОГО ФОРМАТА

В данной статье описывается разработанное оборудование, позволяющее измерять фотоелектрические параметры многоэлементных фотоприемников, в частности, различных форматов микросхем ПЗСЭУ (приборы с зарядовой связью и электронным умножением). Представлены методы измерения и результаты испытаний на темновые токи, чувствительность выходного усилителя, эффективность переноса заряда, зарядную емкость и другие параметры. Исследования проводились на образцах следующих форматов: 576×288, 640×512, 768×576, 1024×1024 и 1280×1024, как на пластине, так и в корпусе.

Ключевые слова: фотоприемник, ПЗСЭУ, прибор с зарядовой связью и электронным умножением, измерительная система, фотоелектрические параметры.

К. ф.-м. н. А. Д. ЄГОРОВ, В. А. ЄГОРОВ, С. А. ЄГОРОВ, І. Є. СІНЕЛЬНИКОВ

Україна, м. Харків, Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України

E-mail: yegorov@ire.kharkov.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ ЕФЕКТА БЛУМІНГА ПЗЗ-ДЕТЕКТОРІВ ОПТИЧНОГО СПЕКТРУ

Представлено результати порівняльних досліджень впливу ефекту насичення і розпливання зарядів на якість і динамічний діапазон зображень, одержуваних за допомогою приладів із зарядовим зв'язком з лінійною структурою декількох типів. На прикладі зареєстрованих спектрів показано ступінь нелінійних спотворень зображень яскравих спектральних ліній. Запропоновано спосіб зменшення впливу цього ефекту, а також описано апаратуру та методичне забезпечення для її реалізації в практиці атомно-емісійної спектроскопії.

Ключові слова: прилади із зарядним зв'язком (ПЗЗ), блумінг-ефект, нелінійні спотворення, динамічний діапазон, закон взаємозамісності.

Багатоеlementні напівпровідникові детектори набувають все більшого поширення в практиці оптичної спектроскопії, але багато хто відзначає такі їхні недоліки, як недостатній динамічний діапазон і нелінійність світлосигнальної характеристики. Так, в роботах [1, 2] розкриваються особливості архітектури ПЗЗ-фотоприймачів і фактори, що обмежують динамічний діапазон сенсорів, а також розкривається сутність явища розпливання зарядів (ефект блумінгу) в приладах із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) [2] і вплив засобів пригнічення блумінга (антиблумінгу) на лінійність ПЗЗ-фотоприймачів [3]. В [4] досліджуються динамічні і спектральні характеристики КМОН-фотоприймачів S11639 шляхом аналізу спектрів безперервних спектральних джерел, таких як галогенова лампа і дейтерієва лампа, а в [5] виконане порівняльне дослідження цього сенсора з ПЗЗ-сенсорами TCD1205 компанії Toshiba та ILX511 компанії Sony, які мають антиблумінг. В [6, 7] виконане експериментальне дослідження динамічного діапазону спектрометра з лінійним ПЗЗ-фотоприймачем TCD1304 компанії Toshiba для відносно широкосмугових спектрів світлодіодів. В [1, 8, 9] надаються описи деяких методів алгоритмічного і апаратного розширення динамічного діапазону ПЗЗ сенсорів. В [10] пропонується додати додатковий канал реєстрації з пікселями меншого розміру. Але при цьому в літературі відсутні порівняння найбільш поширених сенсорів TCD1304 з сенсорами інших типів, а також дослідження щодо можливостей розширення їхнього динамічного діапазону в області великих сигналів.

Дослідження динамічного діапазону ПЗЗ-сенсорів у випадку окремо розташованих ліній атомно-емісійних спектрів проводилося нами раніше [11]. Метою даної роботи було виконання порівняльних досліджень динамічного діапазону сенсорів залежно від наявності в них антиблумінгу, а також розробка шляхів його розширення при спектрофотометричних вимірюваннях.

Експериментальна установка

Із аналізу попередніх досліджень та загальних міркувань авторами було зроблено висновок про те, що застосування зустрічного транспортування зарядів може відкрити принципово нові можливості лінеаризації світлосигнальної характеристики фотодетекторів. Для більш поглибленого вивчення цих питань з урахуванням високої насиченості атомно-емісійних спектрів експериментальна установка, описана в [12], була модифікована таким чином, щоб забезпечити детектування спектра ПЗЗ-лініями детекторів із зустрічним напрямком транспортування зарядів. Основою експериментальної установки була мультисенсорна камера на базі ПЗЗ з лінійною структурою без антиблумінгу TCD 1304 компанії Toshiba [13]. Крім того, для порівняльних досліджень застосовувалися кілька модифікацій односенсорних ПЗЗ-камер з фотоприймачами TCD1205 і ILX511, які мають антиблумінг. Всі камери — оригінальної авторської розробки. Основні параметри досліджуваних ПЗЗ-фотоприймачів наведено в **таблиці**.

Особливістю сенсорів всіх досліджуваних фотоприймачів є велика, сильно витягнута, апер-

Тип сенсора	Розмір пікселя, мкм	Кількість пікселів	Наявність антиблумінгу	Чутливість, В/(лк·с)	Динамічний діапазон
TCD1304 (Toshiba) [13]	8×200	3648	–	160	300
TCD1205 (Toshiba) [14]	14×200	2048	+	80	400
ILX511 (Sony) [15]	14×200	2048	+	200	267

тура пікселів, що добре узгоджується з формою щільності спектральних приладів. Сенсори компанії Sony мають обмежений спектральний діапазон чутливості в ультрафіолетовій області спектра, що в деяких випадках вимагає застосування додаткового люмінофорного покриття.

Одним з недоліків ПЗЗ, що випускаються серійно, є недостатні лінійні розміри фотоприймачів вздовж напрямку дисперсії. Зазвичай спектральний діапазон атомно-емісійних аналізаторів становить 200–400 нм. При типовому спектральному розділенні 10 нм і розмірах зображення спектра 200 мм необхідна загальна кількість пікселів в камері реєстрації становить приблизно 20000. Наведені в таблиці сенсори мають довжину фоточутливої області 28,672–29,184 мм при загальній кількості пікселів від 2048 до 3648, тому застосування одиночних фотодетекторних лінійок прийнятне тільки для спектрографів з малою довжиною спектра. Для подолання цього обмеження застосовують мультисенсорні ка-

мери з шаховим розташуванням детекторних лінійок і спеціальні оптичні схеми розведення спектра на кілька рядів ПЗЗ [16]. Блок-схему та зовнішній вигляд мультисенсорної камери зображено на **рис. 1**.

Камера встановлювалася на місце касети з фотопластинкою в спектрограф ДФС-452 (також можна використовувати промислові спектрографи типу ИСП-28, ИСП-30, ДФС-458). В ній використовуються ПЗЗ TCD1304, що не мають антиблумінга. Камера складається з плати управління та двох мультисенсорних плат, розташованих одна над одною. Для зв'язку із зовнішнім комп'ютером плата управління містить контролер інтерфейсу USB, виконаний на базі мікросхеми FT232H компанії FTDI Chips [17]. Основні схеми синхронізації, управління, прийому, перетворення і передачі даних виконано на програмованій логічній матриці EP3C10E144 Cyclone III (Intel/Altera) [18].

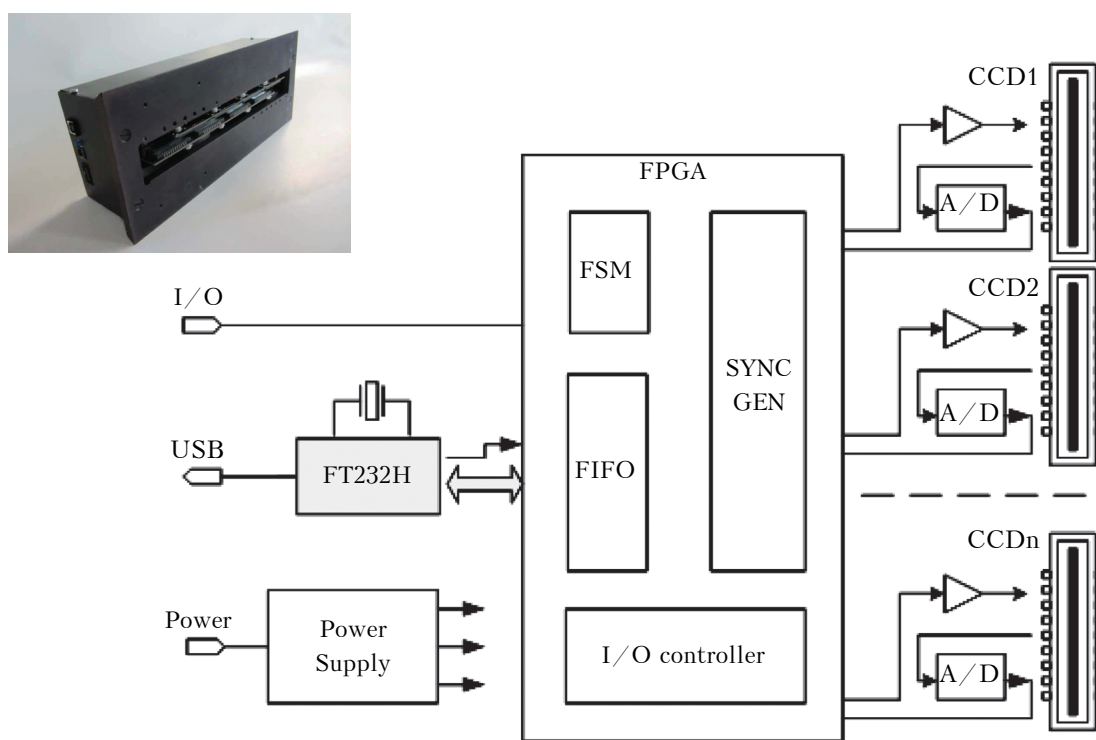


Рис. 1. Структурна схема мультисенсорної камери, а також її зовнішній вигляд (на вісім ПЗЗ-сенсорів): CCD1 ... CCDn – ПЗЗ; FPGA – програмована логічна матриця; FT232H – контролер інтерфейсу USB; A/D – АЦП; Power supply – схеми живлення

Мультисенсорні плати містять буферні формувачі сигналів, аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) (по одному для кожного сенсора), схеми посилення і узгодження рівнів. На платах розміщуються елементи кріплення і дзеркальні оптичні відбивачі, які розводять зображення спектра на два ряди сенсорів. Плати збираються в пакет і забезпечують реєстрацію спектра двома рядами сенсорів, розташування яких представлено на **рис. 2**. За звичайної, стандартної, конфігурації сенсори розташовуються зі зміщенням на величину, меншу довжини фоточутливої зони одного фотоприймача, як це показано на рисунку. В цьому випадку під час одного експонування частина спектра реєструється одним рядом лінійок, а частина — в області перекриття — двома. (На **рис. 2** перекриття умовно показано рівним одному пікселю, але в реальній камері воно становило 235 пікселів.)

На **рис. 3** для ілюстрації представлено зображення ділянки спектра, одержаного однією ПЗЗ-лінійкою TCD1304. З рисунка видно, що тільки ті лінії, амплітуда яких менша за 3000 відліків АЦП, зберігають свою форму. Спочатку лінії досягають амплітудного обмеження. Подальше зростання експозиції призводить до асиметричного, в напрямку транспортування зарядів в ПЗЗ-реєстрі, розпливання ліній, обумовленого блумінг-ефектом. При реєстрації слабких ліній основними компонентами шуму є флуктуації світлового потоку і шуми зчитування. Обидва компонента зменшуються зі збільшенням часу експозиції. Але оскільки задавати різну експозицію для різних ділянок спектра однієї лінійки неможливо, доводиться вдаватися до процедури лінеаризації з використанням даних про дотримання закону взаємозамісності [11].

Одним із способів розширення динамічного діапазону в області великих сигналів є реєстрація спектра з декількома експозиціями: сильні лінії бажано вимірювати з короткою експозицією, а слабкі — з довгою. Тоді, якщо буде дотримуватись закон взаємозамісності яскравості

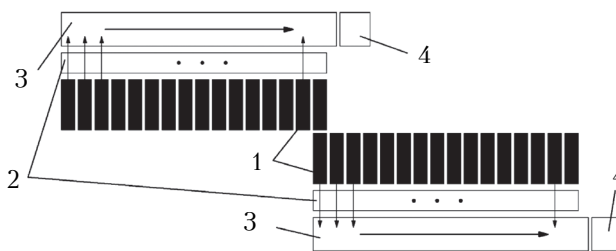


Рис. 2. Шахове розташування ПЗЗ-сенсорів:

1 — фоточутлива область сенсорів (лінійки фотодіодів); 2 — стоп-клапан; 3 — транспортні реєстри; 4 — схеми детектування зарядових пакетів

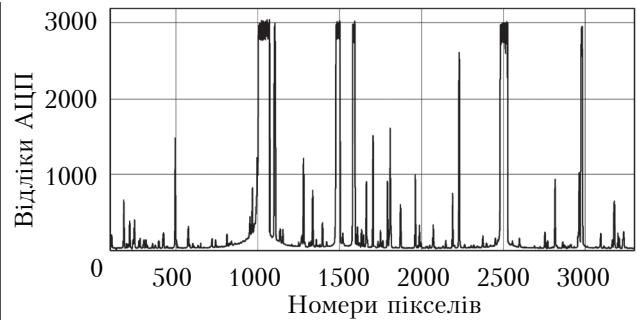


Рис. 3. Спектр газорозрядної неонових лампи ТМН-2 при часі експонування 1,892 с (напрямок транспортування зарядів — вправо)

та витримки, і сильні лінії не будуть перевантажуватися, і слабкі вдасться витягнути з шумів [1, 6]. Особливо шкідливим є асиметричне розповзання заряду в бік транспортування зарядових пакетів в ПЗЗ-реєстрі зсуву даних, бо це маскує сусідні лінії [6].

Відомо [19], що ПЗЗ-детектори мають в своєму складі секції детектування і накопичення зарядів, а також секцію транспортування зарядових пакетів на вихід сенсора. Кожна з цих секцій має свої недосконалості, і їх бажано вивчати окремо. У даній роботі для вивчення процесів, що відбуваються в транспортних реєстрах, використовується два ряди ідентичних ПЗЗ-сенсорів, які мають різні напрямки транспортування зарядів. Для цього в одному з рядів ПЗЗ-фотоприймачі були розвернуті на 180° , що дало стовідсоткове перекриття (**рис. 4**). У цьому випадку зображення, отримані верхнім і нижнім рядами лінійок, збігаються. Це в два рази збільшує кількість відліків і за нормальних шумів підвищує точність в $2^{1/2}$ разів. Якщо пікселі фотодетекторів в одному ряді лінійок мають меншу площу, ніж в іншому, тоді можна вимірювати дуже яскраві лінії без перевантаження і тим самим розширювати динамічний діапазон, як це пропонується в [10].

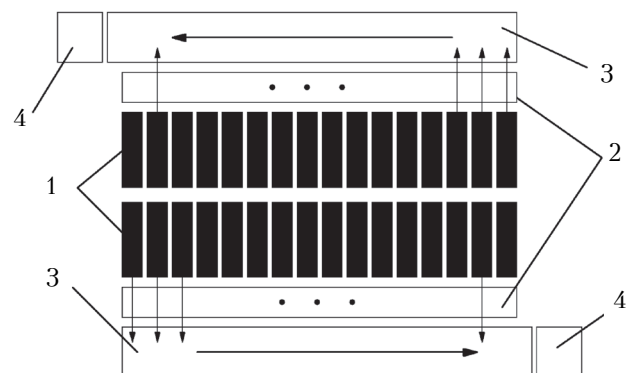


Рис. 4. Паралельне розташування ПЗЗ-сенсорів із зустрічним транспортуванням зарядів (позначення такі ж, як на **рис. 2**)

Лінеаризація світлосигнальної передавальної функції

З використанням описаної мультисенсорної камери були проведені вимірювання спектра лампи тліючого розряду ТМН-2. Аналізувалася дуже яскрава лінія, що розташована поблизу пікселя № 1000 на рис. 3. Отримані результати фотометрування представлені на **рис. 5**, де з більшою деталізацією зображена ділянка спектра, отримана з двома різними експозиціями при транспортуванні заряду в протилежних напрямках. З цього рисунку видно, що форма спектральних ліній, зареєстрованих з малою експозицією (пунктир), не залежить від напрямку транспортування зарядів, а для отриманих з великою експозицією спостерігається їхнє асиметричне розпливання з деформацією одного з фронтів. Для відтворення форми спектра перевантаженої лінії пропонується «відрізати» спотворені половинки зображень, а одержані залишки числовими методами скласти по лінії розрізу, як це показано на **рис. 6**. За наявності шумів результат такої компіляції буде залежати від точності визначення координати симетрії лінії, зображеної пунктиром, і якщо для виконання цієї процедури застосувати інструменти методу найменших квадратів, то можна розраховувати на її достатню коректність.

Зазначимо, що частинами, які були «відрізані», теж не слід нехтувати — їх доцільно використовувати для оцінки аналітичного параметра. Якщо їх також скласти по тій же лінії розрізу, то будемо мати дуже розширену, а не зву-

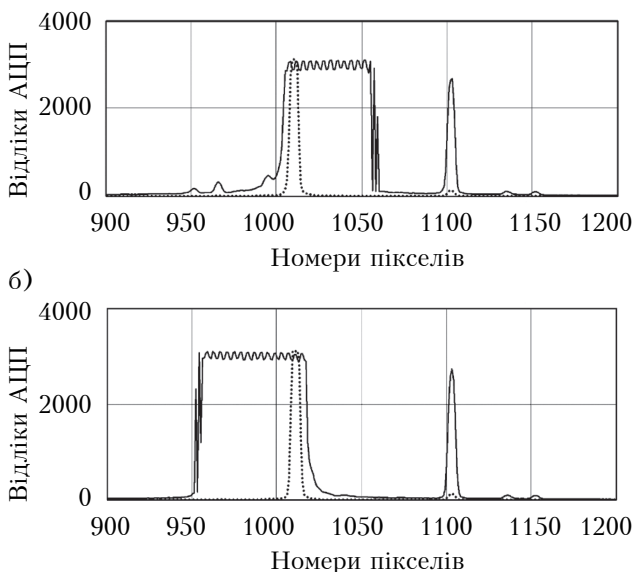


Рис. 5. Спектри, зареєстровані за умов зустрічного транспортування зарядових пакетів в ПЗЗ без антиблумінга (з напрямком транспортування вправо (а) та вліво (б) з часом експонування 1,892 с (суцільні лінії) та 0,083 с (пунктирні лінії))

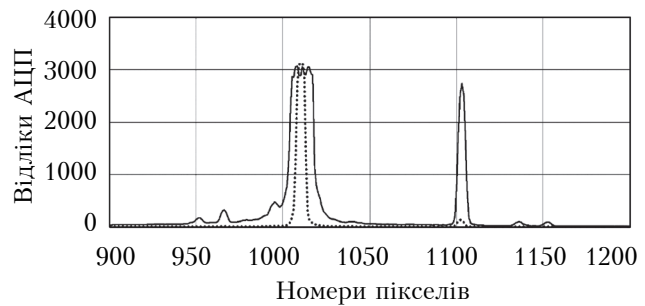


Рис. 6. Результат компіляції графіків, представлених на рис. 5

жену, як на рис. 6, лінію. Площа під цією лінією буде зростати й при перевантаженні лінії. Таким чином, якщо в ролі аналітичного параметра використовувати площу під спектральною кривою, то наявність блумінга можна перетворити з недоліку в перевагу. В результаті можна зареєструвати і слабкі лінії, і відновлені, рідко розташовані сильні лінії. Амплітудні характеристики цих сильних ліній можуть бути відновлені з залученням даних про їхнє розширення та дотримання закону взаємозамісності, що дозволить у разі збільшити динамічний діапазон. Ступінь можливого збільшення діапазону залежить від виду спектра, і більш надійний висновок про можливість застосування цього методу можна буде зробити тільки за результатами його практичного застосування.

Таким чином, результатом виконання описаних перетворень є лінеаризована версія спектра з розширеним динамічним діапазоном, для остаточної обробки якої доцільно застосовувати метод максимальної правдоподібності [20].

Порівняння із сенсорами з антиблумінгом

З метою вивчення питань дотримання закону взаємозамісності були також досліджені лінійками ПЗЗ-детекторів з антиблумінгом TCD1205, ILX511 (див. таблицю).

З точки зору того, що у сенсорах цього типу відсутнє розтікання зарядів на сусідні пікселі, можна припустити, що вони мають широкий динамічний діапазон. Для перевірки цього припущення були виконані порівняльні дослідження закону взаємозамісності яскравості лінії і тривалості експозиції для лінійок різних типів. Результати фотометрування спектральних ліній різної амплітуди ділилися на величину тривалості експозиції. Згідно з законом взаємозамісності, отримані частки від операції ділення не повинні залежати від тривалості експозиції, тобто вони мають лягати на пряму, паралельну осі експозиції. Відхилення від цієї прямої свідчать про наявність нелінійностей світлосигнальної функції сенсора.

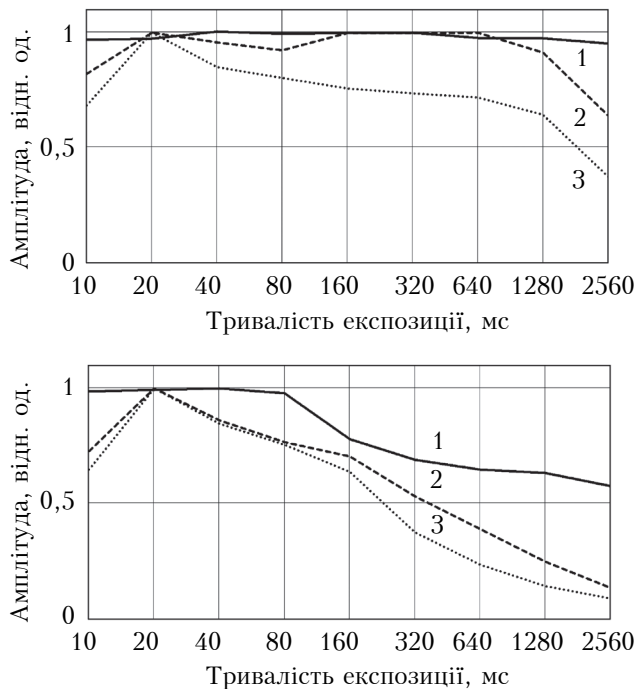


Рис. 7. Вплив тривалості експозиції на поведінку спектральних ліній малої (а) та великої (б) амплітуди, отримані лінійками з різних ПЗЗ-детекторів: 1 – TCD1304 (без антиблумінга); 2 – ILX511 (з антиблумінгом); 3 – TCD1205 (з антиблумінгом)

Графіки на **рис. 7** ілюструють поведінку функції взаємозамісності для двох спектральних ліній, зареєстрованих сенсорами трьох типів: **рис. 7, а** відноситься до лінії з номером пікселя 495, **рис. 7, б** – з номером 1580 (нумерацію див. на **рис. 3**) і відрізняються між собою за амплітудою приблизно в десять разів. З наведених даних випливає, що серед протестованих сенсорів закону взаємозамісності найкраще відповідає лінійка ПЗЗ без антиблумінга TCD1304. Тобто застосування ПЗЗ-детекторів з вбудованими апаратними засобами пригнічення ефекту блумінга, а також приладів з зарядовою інжекцією або КМОН-сенсорів, що не піддаються цьому ефекту, не є ефективним для проведення вимірювань в широкому діапазоні амплітуди. Це пов'язане, по-перше, з тим, що схеми антиблумінгу займають до 30% корисної площі детектора і, отже, погіршують використання фоточутливої площі фотоприймача [21]. По-друге, електрони, що генеруються світлом, втрачаються безповоротньо і тому не можуть бути використані для фотометрування. В цьому відношенні сенсори без антиблумінга ведуть себе принципово по-іншому. Вони не «зливають» надлишкові заряди повз системи реєстрації, а передають їх уздовж транспортного регістра через вимірювальні елементи в систему обробки. Таким чином, надлишкові заряди можуть, в принци-

пі, бути використані для підвищення фотометричної точності.

Як свідчить **рис. 7**, лінії 1, отримані при застосуванні сенсорів без антиблумінга, зберігають горизонтальне положення в більшому діапазоні, ніж лінії 2 та 3, отримані при застосуванні сенсорів з антиблумінгом, і тільки при великій тривалості експозиції вони починають «провалюватися». Це є наслідком того, що в таких умовах частина зарядів все ж таки втрачається, але ці втрати менші, ніж у сенсорів з антиблумінгом. Наявність антиблумінга в детекторі завжди передбачає його нелінійну світлосигнальну характеристику за рахунок «зливу» заряду, що перевищує певне значення, а різного роду втрати, в тому числі і накопиченого заряду, негативно позначаються на точності.

Висновки

Аналіз представлених експериментальних результатів дозволяє зробити висновки про те, що основним обмежуючим фактором динамічного діапазону у випадку сильних сигналів є перевантаження схем накопичення і перенесення фотоелектричних зарядів структурами детектора, але цей негативний ефект можна використовувати для розширення динамічного діапазону фотоприймача.

Для ослаблення впливу ефекту блумінгу на результат аналізу пропонується наступне:

- в процесі вимірювань контролювати нелінійність трактів накопичення і перенесення заряду для встановлення дотримання принципу взаємозамісності яскравості ліній і тривалості експозиції;

- використовувати заряд, що асиметрично розпливається при перевантаженнях, для розширення динамічного діапазону, застосовуючи взаємно протилежні напрями його транспортування відносно спектру.

Специфіка емісійних спектрів, коли перевантажені лінії розташовуються відносно рідко, допускає застосування запропонованої методики. В цьому випадку сенсори без антиблумінгу, не зважаючи на розтікання зарядів, характеризуються більшою лінійністю амплітудної характеристики.

Недоліком запропонованого методу є зниження його ефективності у випадках наявності в спектрі близько розташованих ліній високої інтенсивності, але слід зазначити, що в практиці емісійного аналізу це явище зустрічається доволі рідко.

Отримані результати дозволяють розширити можливості використання серійних ПЗЗ-сенсорів для реєстрації спектрів і відкривають перспективу розробки дворядних ПЗЗ-сенсорів оптичних зображень, які простим подвоєнням

схеми можуть на порядки розширювати динамічний діапазон.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Dynamic Range - Hamamatsu Learning Center [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/emccds.html> (Дата звернення 03.09.2019 р.)

2. CCD Saturation and Blooming. Hamamatsu Learning Center [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/ccdsatandblooming.html> (Дата звернення 03.09.2019 р.)

3. Mueller H., Hing P. Effects of Anti-Blooming in Scientific CCD Cameras // Sensovation AG / Technical Note 60802 [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.sensovation.com/bausteine.net/file/showfile.aspx?downloadid=8572&sp=E&domid=703&fd=0> (Дата звернення 03.09.2019 р.)

4. Jianping Tong, Jianxun Gao, Fei Wang, Hao Yang. Nonlinear correction of the sensor S11639 in mini spectrometer // Opto-Electronic Engineering Journal.— 2017.— Vol. 44, N 11.— P. 1101—1106.

5. McCormick D. Line array sensor comparison // Advanced MEMS, 2016. [Електронний ресурс]: Режим доступу: http://www.advancedmems.com/pdf/AMEMS_LineSensorArraySummary_v1.pdf (Дата звернення 03.09.2019 р.)

6. Кострин Д. К. Анализ спектральных линий с различной интенсивностью при диагностике технологических процессов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ».— 2015.— № 1.— С. 6—7.

7. Кострин, Д. К., Ухов А. А. Светосигнальная характеристика ПЗС-фотоприемника в области больших световых потоков // Контроль. Диагностика.— 2013.— № 5.— С. 40—42.

8. Ухов А. А. Оптические спектрометры с многоэлементными фотоприемниками / Автореф. дис. д-ра тех. наук.— СПб: ЛЭТИ, 2015.

9. Jian-Kang Zhou, Wei-Min Shen, Min-Xue Tang. Extended dynamic-range techniques of CCD measurements // Opto-Electronic Engineering Journal.— 2006.— Vol. 33, N 10.— P. 96—114.

10. Лабусов В.А., Бехтерев А.В. Линейки фотодетекторов — базовые элементы многоканальных анализаторов атомно-эмиссионных спектров // Заводская лабора-

тория. Диагностика материалов.— 2007.— Т. 73, Спец. выпуск.— С. 7—12.

11. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А. Динамический диапазон ПЗС-фотоприемников атомно-эмиссионных анализаторов // Журнал прикладной спектроскопии.— 2019.— Т. 86, № 3.— С. 410—416. <http://dx.doi.org/10.1007/s10812-019-00839-9>

12. Егоров А. Д., Егоров В. А., Егоров С. А. и др. Мультисенсорная камера на приборах с зарядовой связью линейной структуры для спектральных измерений // Радиоэлектронные и компьютерные системы.— 2019.— Т. 90, №2.— С. 80—88.— <http://dx.doi.org/10.32620/reks.2019.2.07>

13. TCD1304AP Toshiba CCD Linear image sensor. Data Sheet.

14. TCD1205DG Toshiba CCD Linear image sensor. Data Sheet.

15. ILX511 2048-pixel CCD Linear Image Sensor (B/W) SONY

16. Бурмий Ж.П., Золотарева Н.И., Хвостиков В.А., Гражулене С.С. Фотоэлектрическая регистрация эмиссионных спектров на основе приборов с зарядовой связью. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов.— 2008.— Т. 74, №6.— С. 26—29.

17. FT232H — Hi-Speed Single Channel USB UART/FIFO IC [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232H.htm> (Дата звернення 03.03.2019)

18. Cyclone III FPGAs [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/programmable/fpga/cyclone-iii.html> (Дата звернення 03.03.2019)

19. Приборы с зарядовой связью / Под ред. М. Хоувза, Д. Моргана.— Москва: Энергоатомиздат, 1981.

20. Косарев Е. Л. Методы обработки экспериментальных данных — Москва: Физматлит, 2008.

21. Fellers T. J., Davidson M. W. Concepts in Digital Imaging Technology. CCD Saturation and Blooming. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/ccdsatandblooming.html> (Дата звернення 03.03.2019)

Дата надходження рукопису
до редакції 20.08 2019 р.

DOI: 10.15222/TKEA2019.5-6.08
УДК 621.383.72

А. Д. ЕГОРОВ, В. А. ЕГОРОВ,
С. А. ЕГОРОВ, И. Е. СИНЕЛЬНИКОВ

Украина, г. Харьков, Институт Радиофизики и электроники
им. А. Я. Усикова НАН Украины
E-mail: yegorov@ire.kharkov.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ ЭФФЕКТА БЛУМИНГА ПЗС-ДЕТЕКТОРОВ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА

Многоэлементные полупроводниковые детекторы светового потока получают все большее распространение в практике оптической спектрометрии. Однако при спектрометрическом применении многие отмечают недостаточный динамический диапазон и нелинейность светосигнальной характеристики таких детекторов. Целью данной работы было выполнение сравнительных исследований динамического диапазона сенсоров в зависимости от наличия антиблуминга, а также разработка путей его расширения при спектрофотометрических измерениях. На экспериментальном материале показан характер нелинейности передаточной светосигнальной функции при сигналах большой амплитуды, показана роль насыщения и размытия (блуминга) изображения сложной системы линий различной амплитуды. Из общих соображений и анализа предыдущих экспериментов сделан вывод о том, что применение встречного транс-

портирования зарядов может открыть принципиально новые возможности линеаризации светосигнальной характеристики фотодетекторов.

Для проведения исследований была создана камера, позволяющая регистрировать одни и те же участки спектра парами детекторных линеек с противоположным направлением транспортировки зарядов в приборах с зарядовой связью (ПЗС). Представлено описание технических решений, применяемых при разработке камеры и результаты измерений реальных эмиссионных спектров. Предложены способы обработки данных, зарегистрированных при такой регистрации спектра. Показана возможность значительного расширения динамического диапазона в области больших сигналов.

Результаты измерений подтверждают возможность использования предложенного способа для линеаризации изображений перегруженных спектральных линий. Выполнено сравнение нелинейности сенсоров нескольких типов, отличающихся наличием/отсутствием встроенных средств подавления блуминга.

Полученные результаты могут быть полезны при разработке ПЗС-регистраторов оптических спектров.

Ключевые слова: приборы с зарядовой связью (ПЗС), блуминг-эффект, нелинейные искажения, динамический диапазон, закон взаимозаменяемости.

DOI: 10.15222/TKEA2019.5-6.08
UDC 621.383.72

A. D. YEGOROV, V. A. YEGOROV,
S. A. YEGOROV, I. E. SINELNIKOV

Ukraine, Kharkiv, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine
E-mail: yegorov@ire.kharkov.ua

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY TO COMPENSATE FOR THE BLOOMING EFFECT IN CCD OPTICAL SPECTRAL SENSORS

The multipixel semiconductor light sensors are becoming more and more popular in the spectroscopy practice. But insufficient for the spectroscopy dynamic range and nonlinearity of such sensors are well known. The described experiment shows nonlinearity of the sensor starting from certain light level. The role of blooming effect is shown on different complex spectral reliefs. The aim of this work was to carry out comparative studies of the dynamic range of sensors depending on the presence of anti-blooming, as well as to develop ways to expand the dynamic range during spectrophotometric measurements. Based on common sense and the analysis of previous experiments it is reasonable to assume that registration of the same spectral region with bidirectional transportation of charges in CCD devices could give extra advantages for the following linearization.

In order to investigate the problem, a camera was created that allows recording the same plots of the spectrum with pairs of detector lines with the opposite direction of charge transport in charge-coupled devices (CCD). The paper presents a description of the technical solutions used in the development of the camera and the results of measurements of real emission spectra. The methods for processing data recorded during such spectrum registering are proposed. The possibility of a significant expansion of the dynamic range in the field of large signals is shown.

The results of the experiment prove the possibility of using the proposed method for linearization of over-illuminated spectral line images. The comparison of the non-linearity of several types of sensors with different anti-blooming capabilities was performed.

The described technology may be used for developing multisensor CCD spectral cameras.

Keywords: charge coupled devices, CCD, blooming effect, nonlinear distortion, dynamic range, reciprocity law.

REFERENCES

1. Dynamic Range - Hamamatsu Learning Center: <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/emccds.html> (Access date 03.09.2019 p.)
2. CCD Saturation and Blooming. Hamamatsu Learning Center: <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/ccdsatandblooming.html> (Access date 03.09.2019 p.)
3. Mueller H., Hing P. Effects of Anti-Blooming in Scientific CCD Cameras // Sensovation AG / Technical

Note 60802: <http://www.sensovation.com/bausteine.net/file/showfile.aspx?downaid=8572&sp=E&domid=703&fd=0> (Access date 03.09.2019 p.)

4. Jianping Tong, Jianxun Gao, Fei Wang, Hao Yang. Nonlinear correction of the sensor S11639 in mini spectrometer. *Opto-Electronic Engineering Journal*, 2017, vol. 44, no. 11, pp. 1101-1106.

5. McCormick D. Line array sensor comparison // Advanced MEMS, 2016: <http://www.advancedmems.com/>

pdf/AMEMS_LineSensorArraySummary_v1.pdf (Access date 03.09.2019 p.)

6. Kostrin D. K. [Analysis of spectral lines with different intensities in the diagnosis of technological processes]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2015, no. 1, pp. 6-7. (Rus)

7. Kostrin D. K., Ukhov A. A. [Light-signal characteristic of a CCD photodetector in the field of large light fluxes]. *Testing. Diagnostics*, 2013, no. 5, pp. 40-42. (Rus)

8. Ukhov A. A. *Opticheskie spektrometry s mnogoel-ementnymi fotopriemnikami* [Optical spectrometers with multi-element photodetectors]. Avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk. St.-Petersburg, LETI, 2015, 32 p. (Rus)

9. Jian-Kang Zhou, Wei-Min Shen, Min-Xue Tang. Extended dynamic-range techniques of CCD measurements. *Opto-Electronic Engineering Journal*, 2006, vol. 33, no. 10, pp. 96-114.

10. Labusov V. A., Bekhterev A. V. [Photodiode arrays are the basic elements of multichannel analyzers of atomic emission spectra]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2007, vol. 73, pp. 7-12. (Rus)

11. Yegorov A. D., Yegorov V. A., Yegorov S. A. Dynamic range of CCD photosensors for atomic-emission analyzers. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2019, vol. 86, iss. 3, pp. 443-448. <http://dx.doi.org/10.1007/s10812-019-00839-9>

12. Yegorov A. D., Yegorov V. A., Yegorov S. A. et al. [Multisensor linear CCD camera for spectrometry]. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2019, vol. 90, iss. 2,

pp. 80-88. <http://dx.doi.org/10.32620/reks.2019.2.07> (Rus)

13. TCD1304AP Toshiba CCD Linear image sensor. Data Sheet.

14. TCD1205DG Toshiba CCD Linear image sensor. Data Sheet.

15. ILX511 2048-pixel CCD Linear Image Sensor (B/W) SONY

16. Burmii Zh. P., Zolotareva N. I., Khvostikov V. A., Grazhulene S. S. [Photoelectric registration of emission spectra based on charge-coupled devices]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2008, vol. 74, no. 6, pp. 26-29. (Rus)

17. FT232H — Hi-Speed Single Channel USB UART/FIFO IC. <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232H.htm> (Access date 03.03.2019).

18. Cyclone III FPGAs. <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/programmable/fpga/cyclone-iii.html> (Access date 03.03.2019.)

19. *Charge-coupled devices and systems*. Ed. by. M. J. Howes, D. V. Morgan. Chichester, Sussex, England and New York, Wiley-Interscience, 1979. 312 p.

20. Kosarev E. L. *Metody Obrabotki Eksperimental'nykh Danykh* [Experimental data processing methods]. Moscow, Fizmatlit, 2008, 208 p. (Rus)

21. Fellers T. J., Davidson M. W. *Concepts in Digital Imaging Technology. CCD Saturation and Blooming*. <http://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/ccdsatand-blooming.html> (Access date 03.03.2019.)

Опис статті для цитування:

Єгоров А. Д., Єгоров В. А., Єгоров С. А., Сінельников І. Є. Дослідження можливостей компенсації ефекта блумінга ПЗЗ-детекторів оптичного спектру. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2019, № 5-6, с. 8–15. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2069.5-6.08>

Cite the article as:

Yegorov A. D., Yegorov V. A., Yegorov S. A., Sinelnikov I. E. Investigation of the possibility to compensate for the blooming effect in CCD optical spectral sensors. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 5-6, pp. 8-15. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.08>

В. П. Зайков, В. І. Мещеряков, Ю. І. Журавльов. Прогнозування показників надійності термоелектричних охолоджуючих пристроїв. Книга 4. Динаміка функціонування однокаскадних ТЕП: монографія. — Одеса: Політехперіодика, 2019.

Книгу присвячено дослідженню основних параметрів, показників надійності та динаміки функціонування термоелектричних охолоджуючих пристроїв (ТЕП) в процесі їх виходу на стаціонарний режим роботи в різних струмових режимах роботи. Запропоновано динамічну модель функціонування охолоджуючого термоелемента, що враховує масу і теплоємність об'єкта охолодження та конструктивних і технологічних елементів (КТЕ). Показано, як впливає теплоємність і маса КТЕ на час виходу пристрою на стаціонарний режим роботи. Також досліджено динаміку функціонування ТЕП з заданою кількістю термоелементів з урахуванням конструктивних і технологічних елементів. Розглянуто побудову ТЕП з заданим часом виходу на стаціонарний режим роботи. Досліджено вплив на характеристики ТЕП параметричних факторів, таких як середньооб'ємна температура гілки термоелемента, ефективність вихідних термоелектричних матеріалів, комбінація параметрів вихідних матеріалів при їхній однаковій ефективності. Розглянуто динаміку процесу виходу на стаціонарний режим роботи ТЕП з фіксованою геометрією гілок термоелементів за заданого теплового навантаження та перепада температури. Отримано співвідношення для оцінки температури теплопоглинаючого спаю в процесі виходу ТЕП на стаціонарний режим. Крім цього, проведено оцінку впливу на динаміку функціонування ТЕП тепловідводної здатності радіатора.

Призначено для інженерів, науковців, а також студентів відповідних спеціальностей, що займаються питаннями надійності елементів електроніки і в цілому РЕА, а також розробкою і проектуванням термоелектричних пристроїв.



¹K. PRAHLADA RAO, ²R. M. VANI, ¹P. V. HUNAGUND

India, Gulbarga University, ¹Department of PG Studies and Research
in Applied Electronics; ²University Science Instrumentation Centre

E-mail: pra_kaluri@rediffmail.com;
prahladielts@yahoo.co.in; pra.shr124@gmail.com

MITIGATION OF MUTUAL COUPLING IN MICROSTRIP ANTENNA ARRAYS

This article demonstrates the alleviation of mutual coupling of a simple and low-cost four-element microstrip array antenna by loading I-shaped slot-type electromagnetic band gap structure in the ground plane. FR-4 glass epoxy is used as dielectric substrate. Moreover, the proposed array antenna shows a better performance in terms of multi-band resonance. The antenna is resonating at four frequencies and a virtual size reduction of 78.48% is obtained. The designed array antenna possesses directional radiation properties. Mentor Graphics IE3D software is used to design and simulate the designed antennas and the measured results are obtained using vector network analyser.

Keywords: dielectric substrate, electromagnetic band gap structure, microstrip antenna array, mutual coupling, resonant frequency, return loss.

Due to increase in the demand to transmit large amount of data in active and passive communication devices, antenna designers are fighting tooth and nail to design wide-band antennas. Microstrip patch antennas came into existence in the year 1971 and have replaced various antennas in variety of applications because of their advantages and superior performance. Since then, extensive research has been carried out by exploiting the various features of these antennas [1]. Microstrip antennas consist of a sandwich of radiating patch, dielectric substrate and ground plane. The radiating patch forms the upper layer, dielectric substrate the middle layer and ground plane the lower layer. Microstrip antennas can be easily fabricated, possess planar structure, have good compatibility with other electrical devices and are economical. However, they suffer from a few limitations like narrow bandwidth and high mutual coupling between the array elements [2].

The limitations of microstrip antennas and arrays can be overcome to a certain extent by using periodic structures, defective ground structures (DGS), metamaterials, etc. Electromagnetic band gap (EBG) structures fall under the category of periodic structures. The high value of mutual coupling is due to the emission of surface waves in the dielectric substrate. Surface waves pose serious threat to the performance of microstrip antennas and arrays. These waves restrict the frequency range of operation of the antennas, reducing the antenna efficiency, gain, and output power level and limiting the bandwidth. Moreover, they increase the end-fire radiation and cross-polarization

levels. EBG structures are capable of improving the performance characteristics of microstrip array antennas. EBG structures allow or forbid the propagation of electromagnetic waves over certain frequency ranges. These bands of frequencies are called band gaps [3].

The authors of [4] designed a 2×5 EBG structure to reduce mutual coupling between patch antennas of MIMO array by 21 dB. The conventional MIMO array is fed by coaxial feed and bandwidth is equal to 3%, producing a gain value of 6.86 dBi. The EBG structure has reduced antenna current from 8.5 to 3.9 A/m. However, the antenna efficiency has been reduced from 65 to 53 %. The authors of [5] have obtained a reduction of 36 dB in mutual coupling in the first band (1.68–2.65 GHz) and 22.1 dB in the second band (6.50–8.86 GHz) using a novel eagle-shaped EBG structure. The bandwidths produced were equal to 31.5 and 30.4 % respectively at appreciable gains of 4 and 6.2 dB. The authors of [6] have presented a novel structure suppressing the mutual coupling between nearby patches from –20.95 to –25.6 dB. However, the gain of the antenna is reduced indicating radiation losses. In [7], the authors have proposed the design of 2×2 microstrip patch array with a 2×2 EBG substrate with respect to the rectangular ground plane. The overall bandwidth of the proposed antenna is 16%. The gain of the antenna with the EBG is 8.45 dBi.

In [8], the authors have proposed a novel compact mushroom-like EBG configuration with a band gap centered at 5.8 GHz WLAN. Mutual coupling was reduced to about 26 dB. The authors of [9] have demonstrated the effectiveness of mushroom-

like EBG structure in improving the performance of microstrip antenna. Lowest back lobe radiation of -10.55 dB is also produced. The authors of [10] have analyzed the isolation properties of different EBG structures and compared them in antenna arrays. With one row of mushroom-like EBG structure, the mutual coupling is -22.5 dB. An approximately 4 dB reduction in mutual coupling is observed with fork-shaped EBG structures. The EBG structure with vias produces the best isolation of 6 dB. The authors of [11] have designed dual-band MIMO antenna system with enhanced isolation. Using a double rectangular DGS, the antenna resonates at 2.6 and 5.7 GHz with bandwidths of 5.7 and 4.3 %, respectively. The proposed antenna has a stable high isolation around -20 dB over all frequencies. At 2.6 GHz, gain and radiation efficiency are 2.63 dB and 59%. The corresponding values at 5.7 GHz are 1.6 dB and 39.8%. MIMO antenna with a double-side EBG structure reduces mutual coupling from -20 to -40 dB. At 2.6 GHz, the antenna gain and radiation efficiency are improved to 4.25 dB and 68.7%. At 5.7 GHz, the antenna gain increases to 1.76 dB and radiation efficiency to 39.8%.

In [12], the authors have reviewed various EBG structures and the methods involved in improving the performance of microstrip antenna arrays. One of the methods is surrounding the antenna with the EBG structure. Four rows of EBG patches are used to suppress the surface waves. Lowermost back lobe radiation of 15 dB lesser than other EBG structures is produced. After achieving positive results using single microstrip patch antenna with EBG structure, four columns of EBG patches were inserted between the array elements, producing an 8 dB reduction in mutual coupling. The authors of [13] have proposed using rectangular and circular EBG structures to investigate the performance of the antenna used in a microwave brain imaging system. The circular EBG is producing better bandwidth of 291.6 MHz compared to 275.5 MHz of the rectangular EBG. Moreover, circular and rectangular EBGs allow for gains of 6.7 and 6.06 dBi, respectively.

The authors of [14] have reported a 5.6 dB coupling reduction by etching out the proposed comb-shaped EBG structure from the ground plane of the microstrip patch MIMO antenna. A metal line strip between the radiating patches is used to further reduce the isolation by 16.2 dB at 5.8 GHz. The authors of [15] have designed a dual band circular patch MIMO antenna on an EBG surface. A healthy reduction in mutual coupling equal to 25 dB is generated between the antenna elements. The -10 dB impedance bandwidth is extended

by 28.9 and 27.8% at the low and high frequency band. Moreover, the gains are enhanced by 5 and 6.9 dB and the back-lobe radiations are decreased by 15 and 10.3 dB at the resonant frequencies of 5.75 and 6.44 GHz respectively. The authors of [16] have employed fractal and two via edge located (TVEL) EBG structures near the feed line to cause triple frequency band notch characteristics over WiMAX (3.3–4 GHz), WLAN (5.1–5.8 GHz) and satellite downlink communications (7.2–7.8 GHz), respectively.

The authors of [17] have demonstrated the filtering characteristics of a compact triple-band-stop filter based on a complementary split ring resonator. The dual-band-stop filter is suppressing bands corresponding to 2.4 and 3.5 GHz (WLAN/WiMax applications), respectively. The single-band-stop filter is suppressing the 5.2 GHz band (WLAN application). The authors of [18] have obtained reduction in mutual coupling by inserting meander line resonator between the patch antennas. With edge-to-edge distance of 6 mm between the two patches, 8–10 dB reduction in mutual coupling is produced throughout the 10 dB impedance bandwidth without affecting the radiation pattern. The authors of [19] have proposed a highly miniaturized microstrip antenna array for small wireless devices. The resonant frequency of the antenna array is shifted from 5.8 to 2.45 GHz, thereby achieving miniaturization of 78.63%. However, the bandwidth of the proposed array is decreased to 157.5 MHz. The authors of [20] have presented the design of a two-element microstrip antenna array using dumb-bell shaped DGS. The gain and bandwidth of the proposed antenna array are 1.94 dB and 100 MHz, respectively. The size reduction obtained is equal to 79%. The gain and bandwidth are enhanced to 4.14 dB and 120 MHz, respectively.

As per the literature review performed, the performance of microstrip antenna arrays is not encouraging in terms of bandwidth. The previous research work shows low bandwidth values of microstrip antenna arrays. Hence, the purpose of the present work is to study the ways to enhance the bandwidth of microstrip antenna arrays in order to achieve better values than those obtained in the previously published research works.

Object of study

The conventional array antenna (CAA) design consists of four identical rectangular radiating patches placed adjacent to each other (**Fig.1**). The design frequency of the CAA is 6 GHz. Here, the CAA is fed using the corporate feeding technique employing three transmission lines of imped-

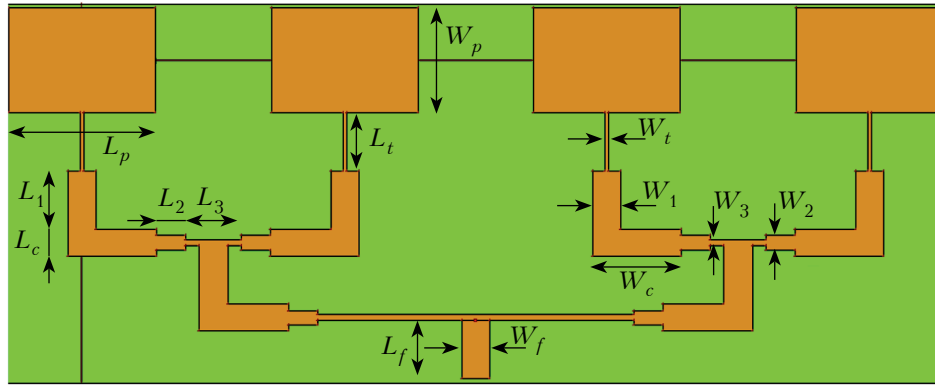


Fig. 1. Schematic of the CAA [21]

ances: 50, 70 and 100 Ω . FR-4 glass epoxy with a dielectric constant of 4.2 and a loss tangent of 0.0245 is used as a dielectric substrate. The height of the dielectric substrate is 1.6 mm. The distance between the adjacent radiating patches (edge to edge) of the CAA is equal to $\lambda/4$, where λ is the wavelength calculated at the design frequency of 6 GHz. The schematic in Fig. 1 is used to determine the return loss characteristics of the CAA. The CAA's dimensions are summarized in the **Table**.

Mutual coupling is a very important parameter that determines the antenna performance. In order to measure mutual coupling between the array elements, the four radiating patches are fed independently as shown in **Fig. 2**, assuming all the four antennas of the array are equally fed.

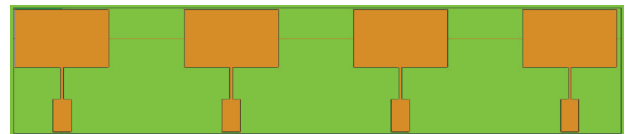


Fig. 2. Schematic of the CAA setup for mutual coupling measurement [21]

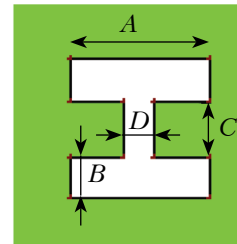


Fig. 3. Schematic of a unit cell of the EBG structure

Parameter values of conventional four-element array antenna [21]

Parameter	Value, mm
Length of the patch (L_p)	15.73
Width of the patch (W_p)	11.76
Length of the quarter wave transformer (L_t)	6.47
Width of the quarter wave transformer (W_t)	0.47
Length of the 50 Ω line (L_1)	6.52
Width of the 50 Ω line (W_1)	3.05
Length of the coupler	3.05
Width of the coupler	3.05
Length of the 70 Ω line (L_2)	3.22
Width of the 70 Ω line (W_2)	1.62
Length of the 100 Ω line (L_3)	6.56
Width of the 100 Ω line (W_3)	0.70
Length of the feed line (L_f)	6.52
Width of the feed line (W_f)	3.05

The I-shaped slot-type EBG structure is now incorporated in the ground plane of CAA to design the modified antenna array. The unit cell of the used EBG structure is shown in **Fig. 3**. The dimensions of the unit cell are $A = 9$ mm, $B = 2$ mm, $C = 2.75$ mm and $D = 1.5$ mm.

Fig. 4 depicts the I-shaped slot EBG structure, consisting of periodically placed I-shape slots arranged in the form of a matrix of 4 rows and 9 columns. The unit cells are arranged along the X and Y axes at a distance of $s = 5$ mm from each other.

Fig. 5 depicts the schematic of the modified antenna array and is used to determine the return loss characteristics of the modified antenna array. The schematic shown in Fig. 6 is used to measure the mutual coupling of the modified antenna array.

CAA has a solid ground instead of I-shaped slot EBG structure. **Fig. 7** and **Fig. 8** depict the photographs of the fabricated modified antenna array.

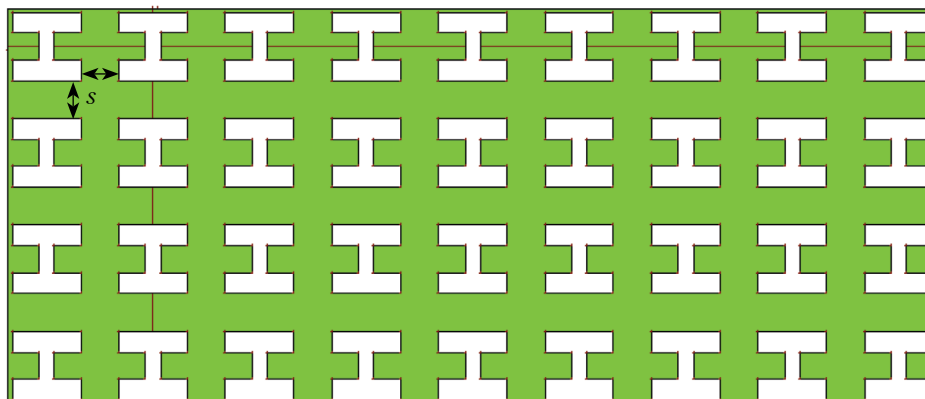


Fig. 4. Schematic of the EBG structure

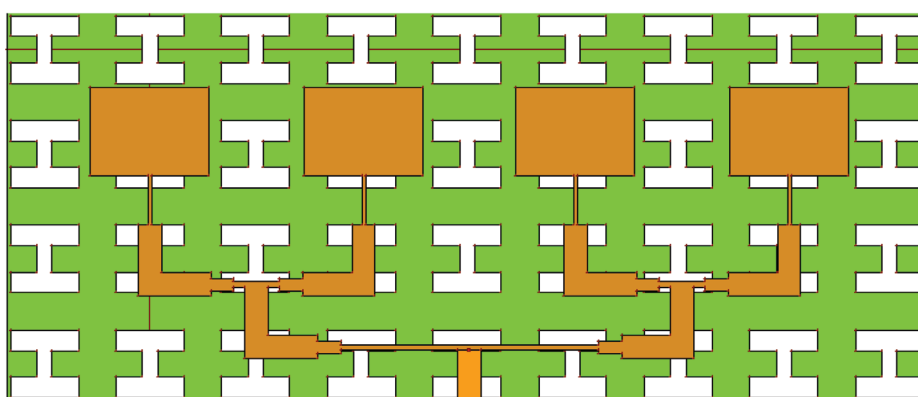


Fig. 5. Schematic of the modified antenna array

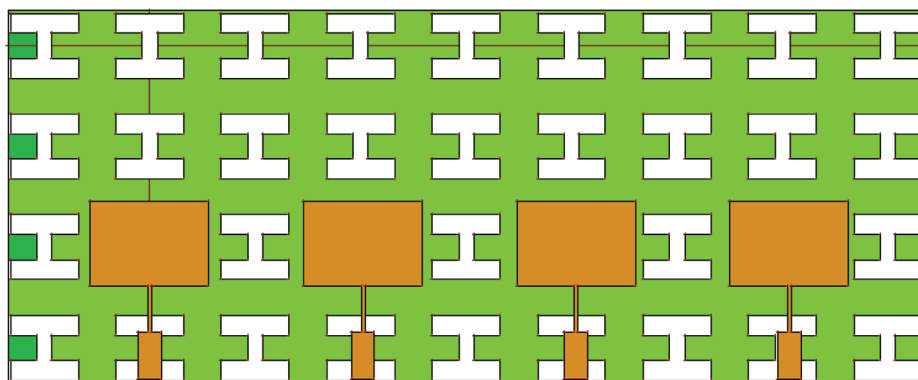
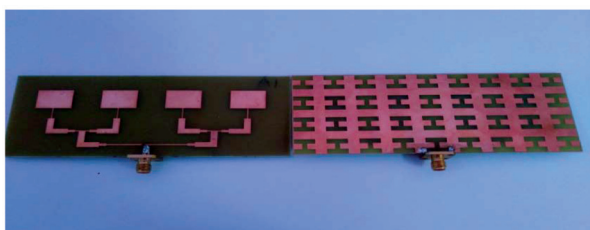
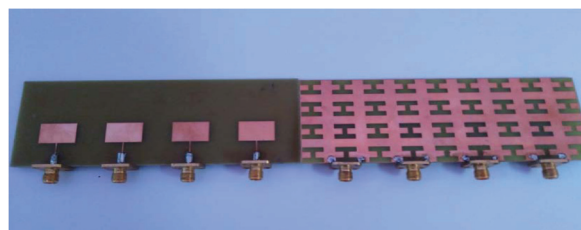


Fig. 6. Schematic of the modified antenna array setup for mutual coupling measurement

Fig. 7. Frontal (*left*) and back (*right*) view of the modified antenna arrayFig. 8. Frontal (*left*) and back (*right*) view of the modified antenna array setup for mutual coupling measurement

Results and discussion

Fig. 9 depicts the simulated and measured return loss characteristics versus frequency of the CAA, where we can see that the CAA is producing simulated and measured resonant frequencies of 5.7 and 5.53 GHz, respectively. The corresponding return loss values are equal to -16.2 and -21.23 dB, respectively.

The bandwidth parameter is obtained by subtracting the lower frequency from the upper frequency where the return loss is -10 dB on either side of the resonant frequency. The simulated and measured bandwidths are equal to 250 and 270 MHz, respectively. Bandwidth is calculated by using equation

$$(\text{bandwidth} / \text{resonant frequency}) \times 100\%. \quad (1)$$

Hence, the simulated and measured bandwidths are equal to 4.39 and 4.89% respectively.

Fig. 10 shows the graphs of simulated and measured mutual coupling characteristics versus frequency of the CAA. As can be seen from this figure, the simulated values of mutual coupling (S_{21} , S_{31} and S_{41}) of the CAA at the resonant frequency of 5.7 GHz are -17.75 , -12.71 and -15.77 dB respectively. The corresponding measured values of mutual coupling at the resonant frequency of 5.53 GHz are equal to -16.95 , -14.22 and -17.30 dB, respectively. The values of mutual coupling of the CAA are very high. Moreover, as can be seen from Fig. 10, the graphs of the measured return loss and mutual coupling of the CAA are overlapping with each other at the resonant frequency of 5.53 GHz. This overlapping implies that there is an interference of signals between the transmitting element 1 and the receiving elements 2, 3 and 4. Hence there is no proper transmission and reception of electromagnetic waves in the CAA.

Fig. 11 shows the simulated and measured return loss characteristics versus frequency of the

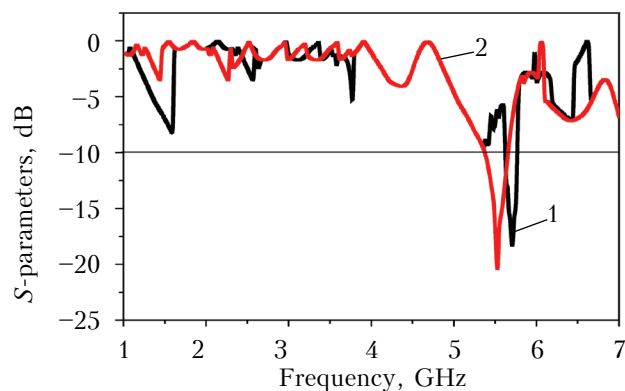


Fig. 9. Simulated (1) and measured (2) return loss S_{11} versus frequency of CAA

modified antenna array. Here one can see that the simulated values of resonant frequencies of the modified antenna array are 1.31, 2.29, 5.7 and 6.42 GHz. The corresponding values of measured resonant frequencies are 1.19, 2.15, 5.53 and 6.57 GHz, respectively. The simulated bandwidths measured at the respective resonant frequencies are 300, 560, 700 and 500 MHz. The measured bandwidths calculated at the respective resonant frequencies are 260, 520, 680 and 520 MHz. Thus, the modified antenna array is

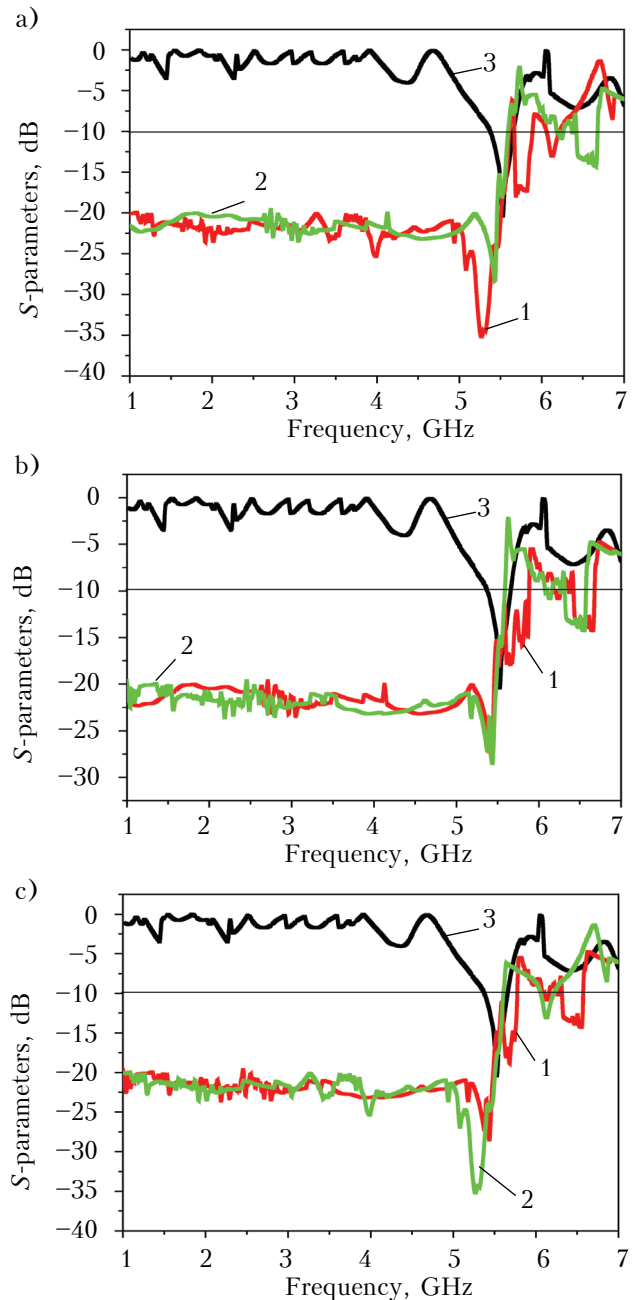


Fig. 10. Simulated (1) and measured (2) mutual coupling versus frequency of the CAA:
a – S_{21} ; b – S_{31} ; c – S_{41}
(plot 3 in the figures is given for the measured S_{11} for comparison)

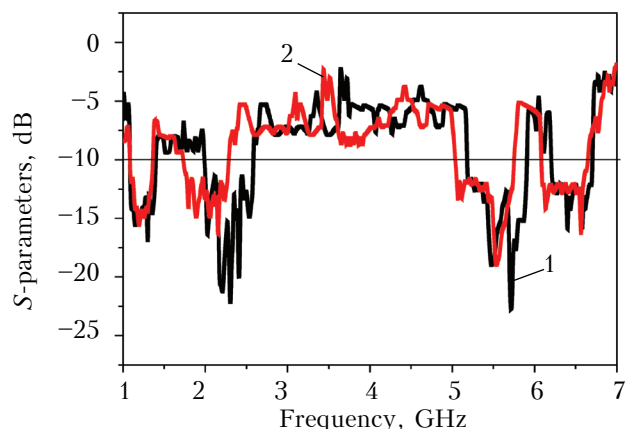


Fig. 11. Simulated (1) and measured (2) return loss S_{11} versus frequency of the modified antenna array

producing multi-bands. Additionally, the modified antenna array is producing increased simulated and measured bandwidths of 700 and 680 MHz at 5.7 and 5.53 GHz compared to 250 and 273 MHz of the CAA at the same resonant frequencies.

Fig. 12 presents the graphs of simulated and measured return loss and mutual coupling characteristics versus frequency of the modified antenna array. The simulated values of mutual coupling at the resonant frequency of 5.7 GHz are -26.53 , -31.55 and -29.43 dB. The corresponding values of the measured mutual coupling at the resonant frequency of 5.53 GHz are equal to -25.93 , -27.93 and -31.89 dB, respectively. The mutual coupling values are reduced considerably by integrating the I-shaped EBG structure with the CAA. The measured return loss and coupling plots are not overlapping at the resonant frequency of 5.53 GHz, which implies a reduced interference between the transmitting and receiving antennas. In this case, therefore, the information transfer is better in comparison to the CAA. Hence, in terms of bandwidth and mutual coupling, the modified antenna array has better characteristics than the CAA does.

The modified array antenna is resonating at a lower fundamental resonant frequency compared to its counterpart, the CAA. The simulated fundamental resonant frequencies of the CAA and the modified antenna array are 5.7 and 1.3 GHz. The measured fundamental resonant frequencies of the CAA and the modified antenna array are 5.53 and 1.19 GHz. The lower value of the fundamental resonant frequency of the modified antenna array compared to that of the CAA leads to a virtual size reduction. The virtual size reduction parameter (%) is calculated thus:

$$(f_1 - f_2) / f_1 \times 100\%, \quad (2)$$

where f_1 and f_2 are the fundamental resonant frequencies of the CAA and the modified antenna array.

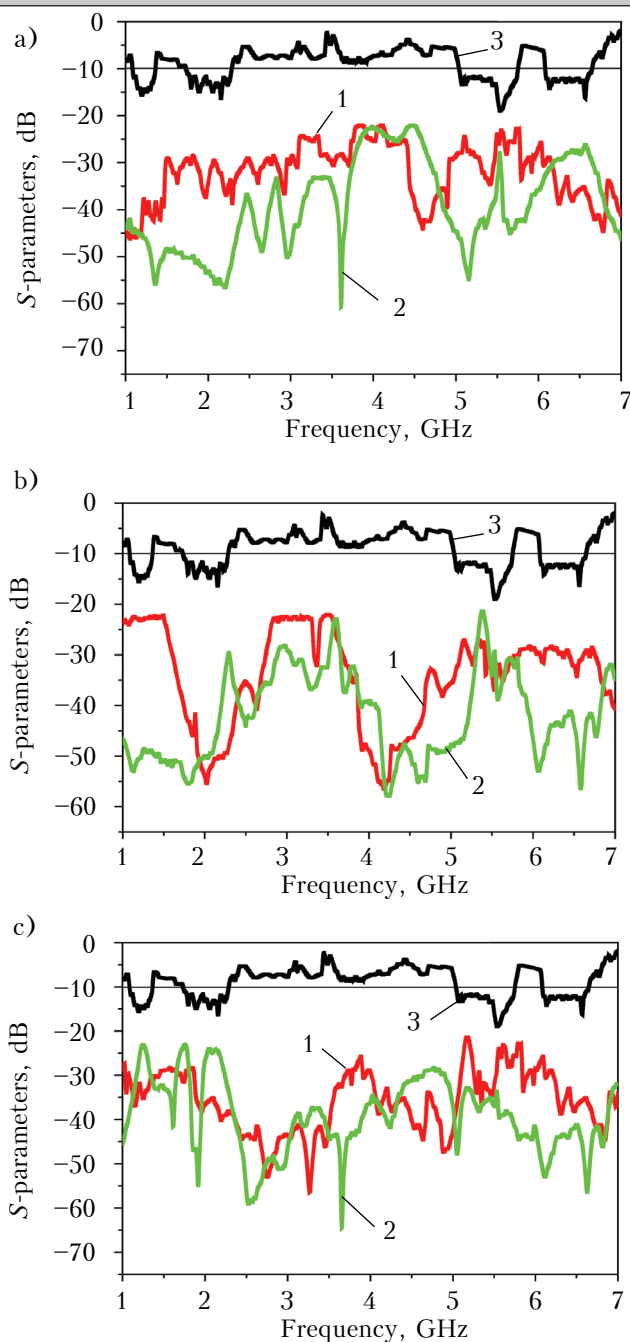


Fig. 12. Simulated (1) and measured (2) mutual coupling versus frequency of the modified antenna array:

$a - S_{21}$; $b - S_{31}$; $c - S_{41}$

(plot 3 in the figures is given for the measured S_{11} for comparison)

Therefore, the simulated and measured values of virtual size reduction produced by modified antenna array are 77.19 and 78.48%.

In order to study the radiation characteristics of the array antenna, its radiation patterns are studied without and with the I-shaped slot-type EBG structure. The radiation plot provides information about the amount of power radiated by the antenna in free space from 0° to 360° .

Fig. 13 presents the radiation plot of the antenna array without and with the I-shaped slot-type EBG structure. The radiation patterns of the CAA and the modified antenna array are plotted at the resonant frequency of 5.53 GHz. The radiation patterns are E-plane power radiation patterns and have been obtained experimentally.

As can be seen in Fig. 13, at the angle of 90° the amount of the radiated forward power is greater with the EBG than without one. The respective powers in the presence and absence of the EBG structure are 0 and -2 dB. Thus, the modified antenna array is radiating more forward power compared to its opponent, i.e., the CAA. At the angle of 270° , the amount of the backward radiated power is decreased with the introduction of the EBG structure. The amount of backward power radiated in the absence of EBG structure is -5 dB. The corresponding power after the introduction of EBG structure is reduced to -11.5 dB. Thus, the modified antenna array is performing better than its counterpart, the CAA, in terms of the forward and backward power.

The front-to-back ratio parameter is determined by subtracting the backward power from the forward power and is measured in dB. Therefore, the front-to-back ratios of antennas with and without the EBG structure are equal to 11.5 and 3 dB, respectively. As the front-to-back ratio of the modified antenna array is greater than that of the CAA, in terms of this parameter, the former makes for a better antenna than the CAA does.

Thus, the modified antenna array is a better candidate than the CAA due to its improved performance in terms of bandwidth, reduction of

mutual coupling, radiation properties, i.e. forward power, backward power, and miniaturization.

Conclusion

In this paper the authors have demonstrated the enhanced performance of the four-element array antenna with the EBG structure. The simulated and experimental results agree to a good extent. The study has shown that with the introduction of two-dimensional I-shaped EBG structure in the ground plane, the four-element array antenna has shown good improvement in the performance characteristics. The modified array antenna is resonating at four different frequencies. Miniaturization of array antenna of 78.48 % has been produced with appreciable reduction in mutual coupling. The radiation characteristics of the array antenna have also been improved. The modified antenna array finds application in the C band of the microwave frequency spectrum.

REFERENCES

1. Balanis C.A. *Antenna theory, analysis and design* (2nd Ed.), John Wiley & Sons Inc, 1997, 941 p.
2. Bahl I.J., Bhartia P. *Microstrip antennas*, Artech House, 1980, 348 p.
3. Fan Yang., Yahya Rahmat-Samii. *Electromagnetic band gap structures in antenna engineering*, Cambridge University Press, 1980, 282 p.
4. Naser-Moghadasi M., Ahmadian R., Mansouri Z. Compact EBG structures for reduction of mutual coupling in patch antenna MIMO arrays. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2014, vol. 53, pp. 145–154.
5. Ahmed M. I., Abdallah E. A., Elhennawy H. M. Novel wearable eagle shape microstrip antenna array with mutual coupling reduction. *Progress in Electromagnetics Research B*, 2015, vol. 62, pp. 87–103.
6. Nagaraj H. C., Rukmini T. S., Paga P. et al. Mutual coupling reduction between planar patch antennas by using electromagnetic band gap structures. *International Journal of Advanced Computing and Electronics Technology*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 87–91.
7. Ada N. R., Ardesana M. A. Electromagnetic band gap (EBG) structure antenna design for wide band applications. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 2015, vol. 2, no. 7, pp. 327–331.
8. Kaabal A., Halaoui M. E., Ahyoud S. et al. A low mutual coupling design for array microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap structures. *Procedia Technology*, 2016, vol. 22, pp. 549–555. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.115>
9. Fangming Cao, Suling Wang. Performance of microstrip patch antennas embedded in electromagnetic band gap structure. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, vol. 360, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48365-7_2
10. Benykhlef F., Boukli-Hacene N. EBG structures for reduction of mutual coupling in patch antenna arrays. *Journal of Communications Software and Systems*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 9–14. <http://dx.doi.org/10.24138/jcomss.v13i1.242>
11. Duong Thi Thanh Tu., Nguyen Van Hoc., Pham Dinh Son. et al. Design and implementation of dual-band MIMO

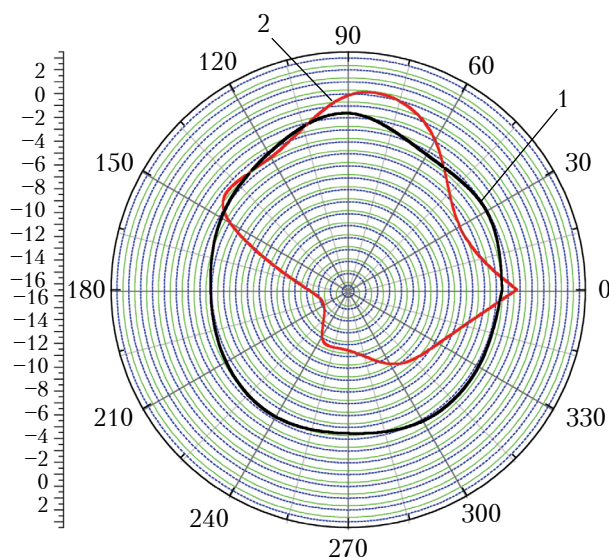


Fig. 13. Radiation patterns of the CAA (1) and the modified antenna array (2)

antenna with low mutual coupling using electromagnetic band gap structures for portable equipments. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 48–60.

12. Abdulhameed M. K., Isa M. S. M., Ibrahim I. M. et al. Review of radiation pattern control characteristics for the microstrip antenna based on electromagnetic band gap (EBG). *Journal of Telecommunications, Electronic and Computer Engineering*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 129–140.

13. Reefat Inum, Md. Masud Rana, Kamrun Nahar Shushama et al. EBG based microstrip patch antenna for brain tumor detection via scattering parameters in microwave imaging system. *International Journal of Biomedical Imaging*, 2018, vol. 2018, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1155/2018/8241438>

14. Niraj Kumar, Usha Kiran Kommuri. MIMO antenna H-Plane isolation enhancement using UC-EBG structure and metal line strip for WLAN applications. *Radioengineering*, 2019, vol. 28, no. 2, pp. 399–406. <https://doi.org/10.13164/re.2019.0399>

15. Xiaoyan Zhang, Yuting Chen, Haitao Ma et al. Design of defective EBG structures for dual-band circular patch MIMO antenna applications. *AECS Journal*, 2019, vol. 34, no. 6, pp. 890–897. <https://doi.org/10.1002/mmce.21287>

16. Mahadu A. Trimukhe., Balaji G. Hogade. Compact ultra-wideband antenna with triple band notch characteristics using EBG structures. *Progress in Electromagnetic Research C*, 2019, vol. 93, pp. 65–77. <https://doi.org/10.22068/IJEE.15.2.195>

17. Mohssine El Ouahabi., Alia Zakriti, Mohamed Essaaidi et al. A very compact of a triple-band bandstop filter based on a complementary split ring resonator. *International Journal of Microwave and Optical Technology*, 2018, vol. 13, no. 6, pp. 537–543.

18. Jeet Ghosh, Sandeep Ghosal, Debasis Mitra et al. Mutual coupling reduction between closely spaced microstrip patch antenna using meander line resonator. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2016, vol. 59, pp. 115–122. <https://doi.org/10.2528/PIERL16012202>

19. Ahmed Ghaloua, Jamal Zbitou, Larbi El Abdellaoui et al. A novel configuration of a miniaturized printed antenna array based on defected ground structure. *International Journal of Intelligent Engineering & Systems*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 211–220. <https://doi.org/10.22266/ijies2019.0228.21>

20. Nataraj D., Karunakar G. Defected ground structure based two element microstrip antenna array with reduced mutual coupling. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2019, vol. 8, no. 6S, pp. 484–489. <https://doi.org/10.35940/ijeat.F1099.0886S19>

21. Vani R. M., Rao P. K., Hunagund G. Study of microstrip antenna array with EBG structure. *Lecture Notes in Electrical Engineering, Optical and Microwave Technologies*, 2017, pp. 81–90. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7293-2_9

Received 27.10 2019

DOI: 10.15222/TKEA2019.5-6.16
УДК 621.3

¹K. PRAHLADA RAO, ²R. M. VANI,
¹P. V. HUNAGUND

India, Gulbarga University, ¹Department of PG Studies and Research in Applied Electronics; ²University Science Instrumentation Centre

E-mail: pra_kaluri@rediffmail.com;
prahladielts@yahoo.co.in; pra.shr124@gmail.com

ВРАХУВАННЯ ВЗАЄМНОГО ВПЛИВУ ОКРЕМИХ МІКРОСМУЖКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ПЕРАМЕТРИ АНТЕННИХ РЕШІТОК

Роботу присвячено дослідженню можливості підвищення ефективності мікросмужкових антенних решіток, які розраховані на роботу у вузькій смузі частот. Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати структури, які утворюють активні електромагнітні зони (АЕЗ) в площині мікросмужкової антенної решітки. Ці зони можуть сприяти поширенню або придушенню електромагнітних хвиль, що призводить до мінімізації впливу поверхневих хвиль, зменшенню взаємного впливу між елементами антенних решіток, а також суттєвому зниженню рівня задньої пелюстки діаграми спрямованості антени.

У статті продемонстровано зменшення, порівняно зі звичайним антенним масивом, взаємного впливу чотирьох елементів базового фрагмента мікросмужкової антени, екрануюча (заземлена) поверхня якої містить АЕЗ-структури I-подібної форми щільного типу. Епоксидне скло FR-4 застосовано як діелектричну підкладку.

Для проектування та моделювання антен використане спеціалізоване програмне забезпечення Mentor Graphics IE3D, а виміряні експериментальні результати отримано за допомогою векторного аналізатора електричних кіл.

Результати досліджень показали, що порівняно зі звичайною запропонована антена демонструє вищу ефективність в умовах багатодіапазонного резонансу. Вона резонує на чотирьох частотах, а її віртуальний розмір менший на 78,48%. Антена характеризується діаграмою спрямованості у потрібному

напрямку, яка забезпечує кращі характеристики випромінювання. Необхідно відмітити компактність даної антенної решітки. Також слід зазначити, що у модифікованій мікросмужковій антенній решітці значно зменшується взаємний вплив елементів, збільшується рівень бажаного сигналу та зменшується рівень небажаного сигналу на частоті 5,53 ГГц, тому така антенна решітка підходить для застосування у С-діапазоні мікрохвильового спектра.

Ключові слова: діелектрична підкладка, структура з активною електромагнітною зоною, мікросмужкова антенна решітка, взаємний вплив, резонансна частота.

DOI: 10.15222/TKEA2019.5-6.16
УДК 621.3

¹K. PRAHLADA RAO, ²R. M. VANI,
¹P. V. HUNAGUND

India, Gulbarga University, ¹Department of PG Studies and Research
in Applied Electronics; ²University Science Instrumentation Centre

E-mail: pra_kaluri@rediffmail.com;
prahladielts@yahoo.co.in; pra.shr124@gmail.com

УЧЕТ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПЕРАМЕТРЫ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Работа посвящена исследованию возможности повышения эффективности микрополосковых антенных решеток, которые рассчитаны на работу в узкой полосе частот. Для решения этой проблемы предлагается использовать структуры, которые образуют активные электромагнитные зоны (АЭЗ) в плоскости микрополосковой антенной решетки. Эти зоны могут способствовать распространению или подавлению электромагнитных волн, что приводит к минимизации влияния поверхностных волн, уменьшению взаимного влияния элементов антенных решеток, а также к существенному снижению уровня заднего лепестка диаграммы направленности антенны.

В статье продемонстрировано уменьшение, по сравнению с обычным антенным массивом, взаимного влияния четырех элементов базового фрагмента микрополосковой антенны, экранирующая (заземленная) поверхность которой содержит АЭЗ-структуры I-образной формы щелевого типа. В качестве диэлектрической подложки применено эпоксидное стекло FR-4.

Для проектирования и моделирования антенн использовано специализированное программное обеспечение Mentor Graphics IE3D, а измеренные экспериментальные результаты получены с помощью векторного анализатора электрических цепей.

Результаты исследований показали, что по сравнению с обычной предложенная антенна обладает более высокой эффективностью в условиях многодиапазонного резонанса. Она резонирует на четырех частотах, а ее виртуальный размер меньше на 78,48%. Антенна характеризуется диаграммой направленности в нужном направлении, которая обеспечивает лучшие характеристики излучения. Необходимо отметить компактность данной антенной решетки. Также следует отметить, что в модифицированной микрополосковой антенной решетке значительно уменьшается взаимное влияние элементов, увеличивается уровень желаемого сигнала и уменьшается уровень нежелательного сигнала на частоте 5,53 ГГц, поэтому такая антенная решетка подходит для применения в С-диапазоне микроволнового диапазона.

Ключевые слова: диэлектрическая подложка, структура с активной электромагнитной зоной, микрополосковых антенная решетка, взаимное влияние, резонансная частота.

Опис статті для цитування:

Rao K. Prahlada, Vani R. M., Hunagund P. V. Mitigation of mutual coupling in microstrip antenna arrays. Технологія і конструювання в електронній апаратурі, 2019, № 5-6, с. 16–24. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.16>

Cite the article as:

Rao K. Prahlada, Vani R. M., Hunagund P. V. Mitigation of mutual coupling in microstrip antenna arrays. Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature, 2019, no. 5-6, pp. 16-24. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.16>

И. В. СОБЯНИН, к. т. н. В. Е. ТРОФИМОВ

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

СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ РЕШАТЕЛЯ СИСТЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ OpenFOAM ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА

*Для анализа теплового режима светодиода и разработки конструкции теплоотвода теплонагруженного светодиодного светильника синтезирована структура решателя задачи, основанная на базовом решателе *laplacianFoam* и функциях библиотеки *swak4Foam* системы математического моделирования OpenFOAM. Проведено сравнение результатов моделирования теплового режима объекта исследования, полученных при использовании модифицированного решателя, решателя проприетарной CAD/CAE-системы SolidWorks и аналитического решения. Приведен пример практического применения.*

Ключевые слова: светодиодный светильник (LED), тепловой режим, теплоотвод, CFD-моделирование, CAD/CAE-системы, OpenFOAM, *laplacianFoam*, *swak4Foam*.

В настоящее время в различных сферах человеческой деятельности все возрастающее применение находят светодиодные светильники [1]. Световая эффективность, цветовая гамма и срок службы их основных элементов — светодиодных излучателей или светодиодов — существенно зависят от тепловой мощности рассеяния и температуры, поэтому одним из обязательных этапов создания таких светильников является анализ их теплового режима, необходимого для разработки конструкции теплоотвода [2–5].

Анализ современных конструкций светодиодов, начиная от дискретных корпусных решений chip-scale packaging (CSP) на основе пластмассы plastic leaded chip carrier (PLCC) или керамики ceramic leaded chip carrier (CLCC) [5, 6] и заканчивая технологией сборки chip-on-board (COB) с непосредственным монтажом кристаллов на подложку [7, 8], а также особенностей применяемых систем теплоотвода [9–13] указывает на то, что для исследования теплового режима светодиодов адекватной тепловой моделью является гладкая или оребренная пластина с произвольно расположенным на ее поверхности источником тепла [14]. В области пластины, занятой источником, имеет место граничное условие (ГУ) 2-го рода. Тепловой поток посредством теплопроводности передается через зону контакта от источника тепла к пластине и так же распространяется по пластине, а затем с поверхности пластины, не занятой источником, рассеивается в окружающую среду путем конвекции и излучения при ГУ 3-го рода. Задача

анализа теплового режима сводится к определению температурного поля в трехмерном анизотропном многокомпонентном пространстве с источником тепла путем решения уравнения теплопроводности Фурье с указанными выше граничными условиями.

Получить распределение температуры в такой тепловой модели позволяет метод компьютерного моделирования, основанный на численном решении эллиптических дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов, который реализован практически во всех современных проприетарных CAD/CAE-системах [15–18]. Этот метод также реализован в свободных и открытых программах продукта указанного типа, среди которых лидирующие позиции занимает система математического моделирования OpenFOAM [19]. Основным ограничительным фактором применения проприетарного программного обеспечения (ПО) является необходимость приобретения дорогостоящих лицензий для полнофункциональных версий [20], а свободное ПО уступает ему по функциональности и характеризуется крайне слабой официальной документированностью, особенно это касается задач анализа тепловых режимов и охлаждения электронных устройств [21]. Так, в системе математического моделирования OpenFOAM имеется два базовых решателя (функции в терминах языка C++), позволяющих получить распределение температурного поля в рассмотренной выше тепловой модели светодиодного излучателя. Это решатели

laplacianFoam [22] и *chtMultiRegionFoam* [23]. Первый из них прост и понятен в применении, но учитывает только ГУ 1-го рода в условиях отсутствия источников тепла. Второй позволяет учесть ГУ 2-го и 3-го рода, но для анизотропной многокомпонентной тепловой модели с источником тепла требует создания крайне сложной файловой системы задачи (case в терминах системы OpenFOAM). Известные применения этого решателя повторяют основные положения скудных официальных руководств и ориентированы на решение более простых задач для других объектов моделирования [24–26].

В этой связи представляет интерес расширение функциональных возможностей решателя *laplacianFoam* для учета наличия источника тепла при ГУ 2-го и 3-го рода, например, путем использования дополнительных функций библиотеки *swak4foam* [27] системы математического моделирования OpenFOAM. Свободное ПО позволяет выполнить такое расширение за счет изменения исходного программного кода базового решателя и файловой системы задачи и получить модифицированные решатель и файловую систему задачи с новыми свойствами.

Целью настоящей работы является синтез структуры решателя и разработка файловой системы задачи на основе базового решателя *laplacianFoam* и функций библиотеки *swak4foam* для анализа теплового режима светодиода и разработки конструкции теплоотвода теплонагруженного светодиодного светильника.

Синтез структуры модифицированного решателя и разработка файловой системы задачи

В основу работы базового решателя *laplacianFoam* положено решение следующего уравнения теплопроводности, справедливо для ГУ 1-го рода в условиях отсутствия источников тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_T \nabla^2 T, \quad (1)$$

где T — температура;

t — время;

DT — температуропроводность;

∇^2 — оператор Лапласа.

Программный код решателя в синтаксисе OpenFOAM в таком случае выглядит следующим образом [22]:

$$\text{solve (fvm::ddt(T) - fvm::laplacian(DT,T)).} \quad (2)$$

Для возможности задания ГУ 3-го рода добавим в уравнение (1) температуру окружаю-

щей среды T_{inf} и температурный коэффициент теплопроводности b :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_T (1 + b(T - T_{\text{inf}})) \nabla^2 T, \quad (3)$$

и тогда программный код решателя будет иметь вид

$$\text{solve (fvm::ddt(T) - fvm::laplacian(DT*(1 + b*(T - Tinf)),T)).} \quad (4)$$

Заголовочный файл интерфейса решателя *createFields.H* для представления температурного поля запишем следующим образом:

```
volScalarField T
(
    IOobject
    (
        "T",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ), mesh
);

volScalarField DT
(
    IOobject
    (
        "DT",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ), mesh
);

volScalarField b
(
    IOobject
    (
        "b",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ), mesh
);
```

Таким образом, данные о температурном поле T , температуропроводности DT и температурном коэффициенте теплопроводности b будут считываться решателем из последней текущей временной директории файловой системы задачи и сохраняться в ней же.

Температуру окружающей среды T_{inf} примем постоянной. Это значит, что ее значение будет считываться решателем из файла

transportProperties директории *constant* файловой системы задачи

```
dimensionedScalar Tinf
(
    transportProperties.lookup("Tinf")
);
```

Тогда, взяв за основу файловую систему задачи для базового решателя *laplacianFoam* [22], можно представить файловую систему задачи для модифицированного решателя. Как видно из **рис. 1**, она состоит из ряда директорий и файлов, содержащих необходимые для работы модифицированного решателя данные. Рассмотрим подробно те из них, в которых решается поставленная в настоящей работе задача.

В директории *0* находятся файлы с начальными значениями параметров *b* и *DT*. В отличие от базового решателя, здесь параметр *DT* может быть использован для анализа многокомпонентной тепловой модели, содержащей одновременно параметры нескольких материалов пластин. Файл *T* содержит начальные значения температуры в расчетной области тепловой модели.

В файле *initialConditions* поддиректории *include* директории *0* хранятся граничные условия задачи. Содержимое этого файла представляет собой несколько структур типа “имя переменной *тип_данных*” (в терминах языка C++) вида:

```
T_flow      double; // температура охлаждающей
               // среды, K
internalT    double; // начальная температура, K
internalDT   double; // температуропроводность
               // внутренних областей
               // расчетной области
               // тепловой модели, м²/с
Tinf         double; // температура окружающей
               // среды для решателя, K
DT_X         double; // температуропроводность
               // X-компонента внешних
               // областей расчетной области
               // тепловой модели, м²/с
b_X          double; // температурный
               // коэффициент
               // теплопроводности
               // X-компонента
               // внешних областей
               // расчетной области тепловой
               // модели, 1/K
lambda_X     double; // теплопроводность
               // X-компонента внешних
               // областей расчетной
               // области тепловой модели,
               // Вт/(м·K)
alpha        double; // коэффициент теплоотдачи,
               // Вт/(м²·K)
q            double; // плотность теплового
               // потока, Вт/м²
```

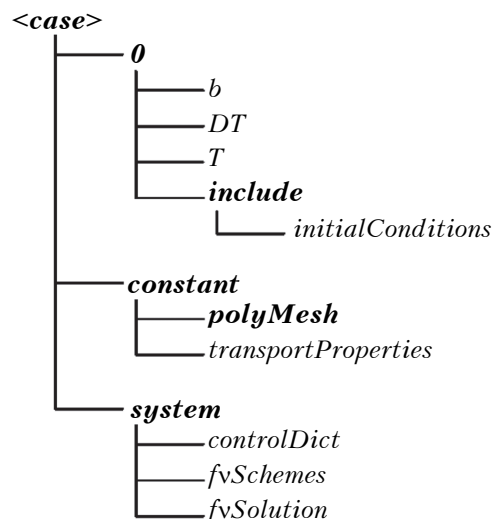


Рис. 1. Файловая система задачи для модифицированного решателя

В этом же файле для задания ГУ 2-го рода в области тепловой модели, занятой источником тепла, используется тип ГУ *groovyBC* из библиотеки *swak4foam* системы *OpenFOAM*, которое представим в структуре *boundaryField* *source_name* следующим образом:

```
boundaryField
{
    source_name
    value          uniform $internalT;
    type           groovyBC;
    variables      "lambda=$lambda_X*(1+
                  b*(T-$Tinf));";
    fractionExpression "0";
    gradientExpression "$q/lambda";
}
```

Здесь переменная *value* задает начальное распределение температуры, используя в качестве своего значения переменную *internalT* из файла *initialConditions*. Параметр *fractionExpression* отвечает за тип ГУ на выбранной поверхности тепловой модели. Для условий Дирихле, т. е. ГУ 1-го рода, его значение равно 1; для условий Неймана, т. е. ГУ 2-го рода, его значение равно 0. При этом плотность теплового потока *q* задается в соответствии с законом Фурье и является значением параметра *gradientExpression*. Здесь теплопроводность *lambda* принимает значение параметра *variables*.

Аналогичным образом представим ГУ 3-го рода на поверхностях тепловой модели, свободных от источника тепла. Для этого воспользуемся структурой *boundaryField* *face_name*:

```
boundaryField
{
    face_name
    value          uniform $internalT;
    type           groovyBC;
    variables      "lambda=$lambda_X*(1+
                  b*(T-$Tinf));";
    valueExpression "$T_flow";
    fractionExpression "1.0/(1.0+lambda/
                  (mag(delta())*$alpha));";
}
```

При этом коэффициент теплоотдачи α входит в выражение для значения параметра *fractionExpression*, которое получено из равенства теплового потока, поступающего к границе тепловой модели посредством теплопроводности, тепловому потоку, отводимому от границы путем конвекции и излучения в окружающую среду:

$$\alpha(T_{\text{face}} - T_{\text{flow}}) = -\lambda \frac{T_{\text{centre}} - T_{\text{face}}}{h}, \quad (5)$$

где T_{face} — температура поверхности;

T_{centre} — температура центра граничного конечного элемента мешированной тепловой модели;

h — расстояние между центром и поверхностью граничного конечного элемента.

Содержимое остальных директорий и файлов файловой системы задачи для модифицированного решателя (см. рис. 1) может быть перенесено из системы для базового решателя *laplacianFoam* без изменений, поскольку является инвариантным применительно к нашей задаче и его назначение хорошо документировано [22].

Оценка адекватности модифицированного решателя

Оценка адекватности модифицированного решателя проводилась путем сравнения результатов моделирования температурного поля тепловой модели, полученных с использованием модифицированного решателя, решателя проприетарной CAD/CAE-системы SolidWorks [16], а также известного аналитического решения в двухмерной постановке [28]. Выбор последнего обусловлен возможностью минимизации необходимых вычислительных ресурсов и оперативностью получения результата, например, в системе математических вычислений SciLab.

В качестве тепловой модели выбрана гладкая прямоугольная пластина длиной $L_x = 100$ мм, шириной $L_y = 50$ мм и толщиной 1,5 мм, на одной стороне которой располагался квадратный в плане источник тепла с размерами $2\Delta\varepsilon = 2\Delta\eta = 13,5$ мм (рис. 2).

Координаты центра источника тепла $\varepsilon = 24$ мм, $\eta = 30$ мм. Коэффициент теплоотдачи на по-

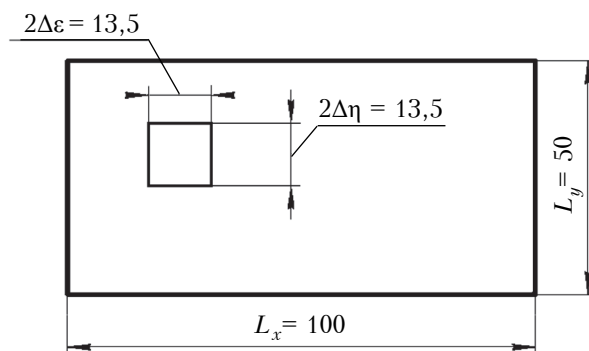


Рис. 2. Тепловая модель

верхностям пластины, свободных от источника, $\alpha = 10$ Вт/(м²·К), что соответствует естественному воздушному охлаждению гладкой плоской поверхности [28]. Теплопроводность материала пластины $\lambda = 193$ Вт/(м·К), что соответствует дюралюминию марки Д16. Мощность источника тепла 10 Вт. Температура охлаждающей среды $T_{\text{inf}} = T_{\text{flow}} = 295,65$ К.

В таблице приведены значения максимальной (T_{max}) и минимальной (T_{min}) температуры тепловой модели при $\alpha = 10$ Вт/(м²·К), а на рис. 3 — зависимости T_{max} от коэффициента теплоотдачи α , полученные различными способами для указанных исходных данных.

Как видно из рис. 3, при естественном воздушном охлаждении ($\alpha = 10$ Вт/(м²·К)) значения максимальной и минимальной температуры тепловой модели, определенные модифицированным решателем и решателем SolidWorks хорошо согласуются между собой — расхождение находится в пределах 1,9–2,5%. При этом аналитическое решение дает результат, сильно (в 1,25 раза) отличающийся в сторону больших значений. При значениях коэффициента теплоотдачи, меньших 10 Вт/(м²·К), что соответствует естественному воздушному охлаждению гладких плоских поверхностей в ограниченном пространстве [28], это отличие еще больше, а результаты компьютерного моделирования, полученные разными решателями, по-прежнему хорошо согласуются между собой. При значениях коэффициента теплоотдачи 25–50 Вт/(м²·К),

Значения максимальной и минимальной температуры тепловой модели, полученные различными способами при $\alpha = 10$ Вт/(м²·К)

Способ решения	T_{max} , К	T_{min} , К
Аналитическое решение, 2D-тепловая модель, SciLab	506,40	484,95
Модифицированный решатель	403,08	380,79
Решатель CAD/CAE-системы SolidWorks	410,84	390,12

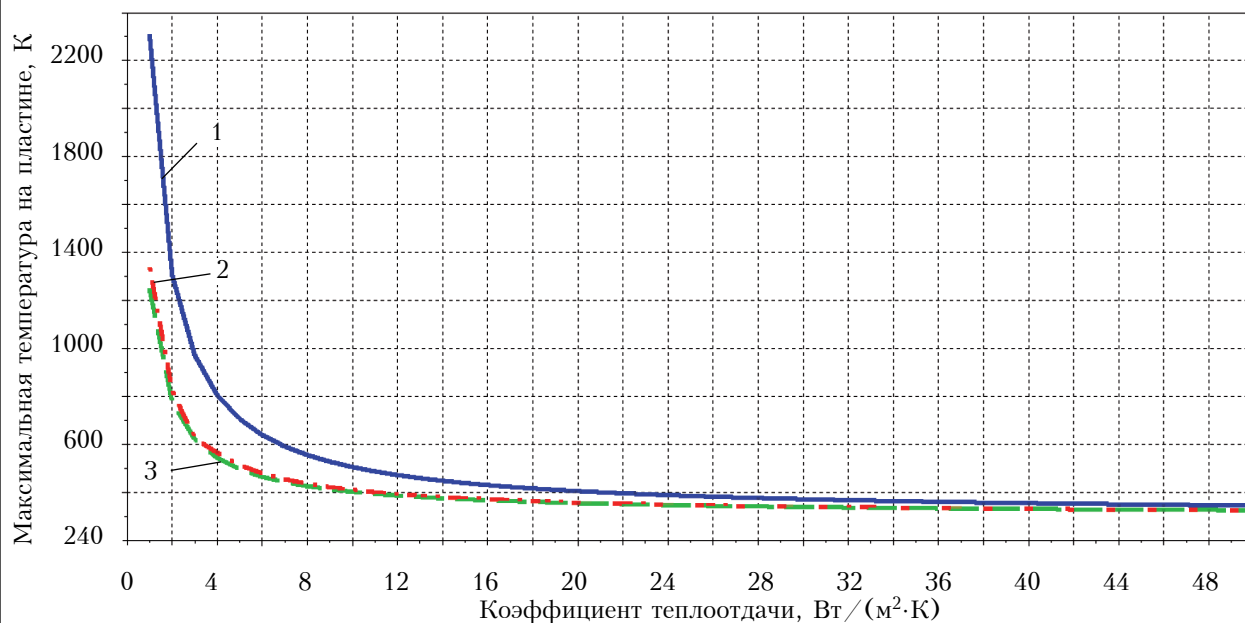


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры тепловой модели от коэффициента теплоотдачи, полученные аналитически (1), решателем SolidWorks (2) и модифицированным решателем (3)

соответствующих принудительному воздушно-му охлаждению, все три варианта определения температуры в тепловой модели дают согласованный результат.

Таким образом, результаты, представленные в таблице и на рис. 3, свидетельствуют об адекватности и функциональности предложенного модифицированного решателя и указывают возможность его практического применения.

Пример практического применения модифицированного решателя

Модифицированный решатель был использован для исследования и анализа теплового режима светодиодного светильника, в котором в качестве излучателя использовался светодиод типа Samsung LC009D [29], установленный на металлический теплоотвод. Теплоотвод представлял собой прямоугольную пластину, одна из поверхностей которой имела оребрение в виде прямых ребер, как показано на рис. 4.

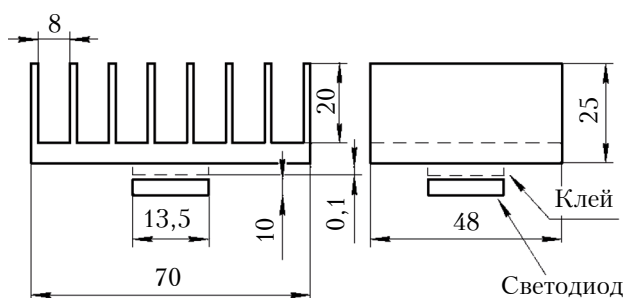


Рис. 4. Светодиод с теплоотводом

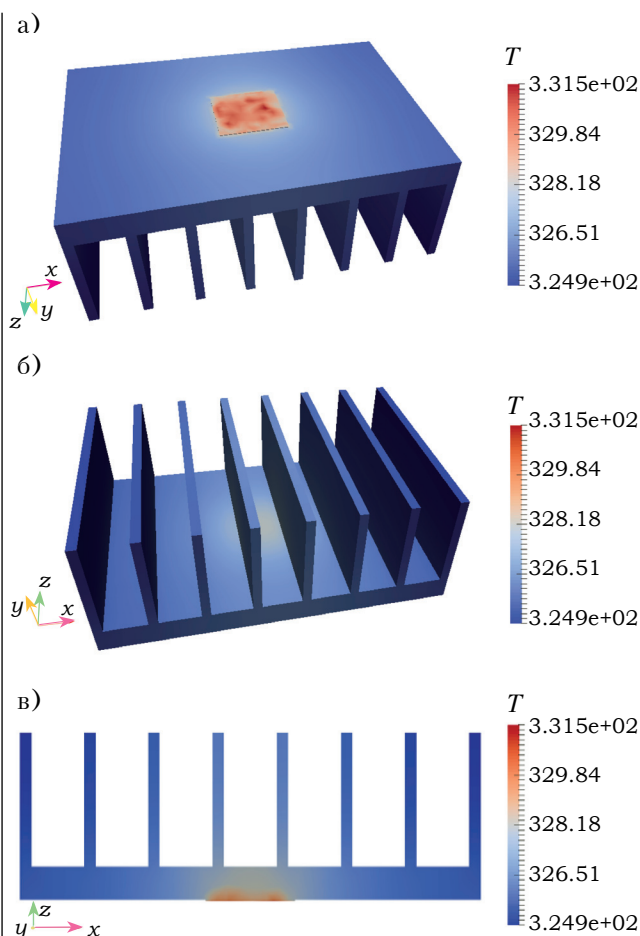


Рис. 5. Температурное поле светодиода и теплоотвода: а – вид со стороны светодиода; б – вид со стороны оребрения; в – поперечное сечение

Один из вариантов исходных данных для объекта исследования был следующим. Эквивалентный диаметр светодиода 13,5 мм, высота 10 мм. Мощность тепловыделения светодиода 10 Вт. Между светодиодом и теплоотводом нанесен слой клея марки Kaufer 5204 толщиной 0,1 мм теплопроводностью 1,5 Вт/(м·К). Габаритные размеры теплоотвода 70×48×25 мм. Материал теплоотвода дюралюминий марки Д16. Количество ребер 8. Расстояние между ребрами 8 мм. Охлаждение поверхностей теплоотвода происходит при коэффициенте теплоотдачи 10 Вт/(м²·К).

Результаты моделирования представлены на **рис. 5**. Визуализация распределения температуры получена путем экспортирования результатов решения задачи модифицированным решателем в визуализатор параллельных вычислений ParaView в соответствии с методикой, изложенной, например, в [21].

Таким образом, результаты моделирования показывают возможность эффективного использования синтезированного модифицированного решателя и разработанной файловой системы для решения практических задач.

Выводы

Как показали исследования, синтезированная в системе математического моделирования OpenFOAM структура решателя и разработанная файловая система задачи для решения уравнения теплопроводности Фурье в трехмерном анизотропном многокомпонентном пространстве с источником тепла при граничных условиях 2-го и 3-го рода позволяют получить практически такие же результаты, как и известный проприетарный решатель. На практическом примере показано, что синтезированный решатель и разработанная файловая система задачи могут быть с успехом использованы для решения такой важной задачи, как анализ теплового режима и разработка конструкции теплоотвода теплонагруженного светодиодного светильника.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Маркова С., Туркин А. Актуальные направления применения мощных светодиодов // Полупроводниковая светотехника. — 2016. — № 3. — С. 56–62. — <https://www.prosoft.ru/cms/f/468322.pdf>
2. Yurtseven M.B., Mete S., Onaygil S. The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs // Lighting Res. Technol. — 2015. — Vol. 48, N 8. — P. 943–965. — <https://doi.org/10.1177/1477153515576785>
3. Schutt Ekaterina. Thermal management and design optimization for a high power LED work light. Degree Thesis. — ARCADA. Plastics Technology 2014. — P. 1–72. — https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/80460/Schutt_Ekaterina.pdf
4. LED Thermal Management // LED professional Review. — 2009. — Iss. 13. — P. 1–64. — https://www.led-professional.com/downloads/LpR_13_468932.pdf
5. Thermal Management of Cree XLamp LEDs. Application Note. — Cree, Inc. — 2019. — 19 p. — <https://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampThermalManagement.pdf>
6. Райт М. Светодиоды в CSP-корпусах для систем твердотельного освещения // CHIP NEWS Украина. — 2016. — № 6 (156). — С. 38–40. — [http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20\(2\).pdf](http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20(2).pdf)
7. Юсупов С. Оптика LEDIL для модулей с Flip-Chip светодиодами // Современная светотехника. — 2015. — № 6. — С. 24–25. — [http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/24\(1\).pdf](http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/24(1).pdf)
8. Ying S. P., Shen W. B. Thermal analysis of high-power multichip COB light-emitting diodes with different chip sizes // IEEE Trans. Electron Devices. — 2015. — Vol. 62, N 3. — P. 896–901. — <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2390255>
9. Schneider M., Leyrer B., Herbold C., Maikowske S. High power density LED modules with silver sintering die attach on aluminum nitride substrates // 2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). — 2014. — P. 203–208. — <https://doi.org/10.1109/ECTC.2014.6897289>
10. Wu Y., Tang Y., Li Z., Ding X., Yuan W., Zhao X., Yu B. Experimental investigation of a PCM-HP heat sink on its thermal performance and antithermal-shock capacity for high-power LEDs // Appl. Therm. Eng. — 2016. — Vol. 108. — P. 192–203. — <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.127>
11. Nikolaenko Yu.E., Kravets V.Yu., Naumova A.N., Baranyuk A.V. Development of the ways to increase the lighting energy efficiency of living space // International Journal of Energy for a Clean Environment. — 2017. — Vol. 18, iss. 3. — P. 275–285. — <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2018021641>
12. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. Light characteristics of high-power LED luminaire with a cooling system based on heat pipe // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2019. — Vol. 22, No 3. — P. 366–371. — <https://doi.org/10.15407/spqeo22.03.366>
13. Лозовой М.А., Николаенко Ю.Е., Рассамкин Б.М., Хайрнатов С.М. Исследование рабочих характеристик тепловых труб для светодиодных осветительных приборов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2014. — №5–6. — С. 32–38. — <https://doi.org/10.15222/TKEA2014.2.32>
14. Собянин И.В. Решение задачи определения температурного поля пластины с источником тепла в системе математического моделирования OpenFOAM решателем laplacianfoam // 36. матеріалів 23-го Міжнар. молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Т.2 «Автоматизовані системи та комп'ютеризовані технології радіоелектронного приладобудування». — Харків: ХНУРЕ, 2019. — С. 5–6. — <https://nure.ua/wp-content/uploads/workshop/konferentsiia-avtomatyzovani-systemy-ta-kompiuteryzovani-tekhnologii-radioelektronnohopryladobuduvannia.pdf>
15. ANSYS Multiphysics. Thermal management [Electronic resource]. — <https://www.ansys.com/products/platform/multiphysics-simulation/thermal-management> (Date of the application 14.11.2019).
16. SOLIDWORKS Flow Simulation. Heat conduction in solids [Electronic resource]. — <https://www.solidworks.com>

com/product/solidworks-flow-simulation (Date of the application 14.11.2019).

17. ELMER. Application examples [Electronic resource]. — <https://www.csc.fi/web/elmer/application-examples> (Date of the application 14.11.2019).

18. COMSOL Heat Transfer Module [Electronic resource]. — <https://www.comsol.com/heat-transfer-module> (Date of the application 14.11.2019).

19. OpenFOAM. The open source CFD toolbox [Electronic resource]. — <http://www.openfoam.com> (Date of the application 14.11.2019).

20. Шеховцова В.І. Проблема вибору та критерії оцінки засобу автоматизованого проектування // Вісник НТУ “ХПІ”. — 2014. — № 26 (1069). — С. 101–108. — http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/9299/1/vestnik_HPI_2014_26_Shekhovtsova_Problema.pdf

21. Trofimov V. E., Pavlov A. L., Mamykin Y. G. CAD/CAE method of solving the hydrodynamic problem while developing powerful electronic devices // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2018. — № 2. — С. 33–41. — <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.33>

22. OpenFOAM. The open source CFD toolbox laplacianFoam [Electronic resource]. — <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-basic-laplacianFoam.html> (Date of the application 14.11.2019).

23. OpenFOAM. The open source CFD toolbox chtMultiRegionFoam [Electronic resource]. — <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-heat-transfer-chtMultiRegionFoam.html> (Date of the application 14.11.2019).

applications-solvers-heat-transfer-chtMultiRegionFoam.html (Date of the application 14.11.2019).

24. Лазарев Т.В. Моделирование теплорелектричного стану за допомогою OpenFOAM // Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та енергозбереження. — 2013. — № 1. — С. 26–30.

25. M. de Groot. Flow prediction in brain aneurysms using OpenFOAM. September 2, 2014 [Electronic resource]. — https://www.utwente.nl/en/eemcs/sacs/teaching/Thesis/masterthesis_meindert_de_groot.pdf (Date of the application 14.11.2019).

26. Juan Marcelo Gimenez, Axel Larreteguy, Santiago M'arquez Dami'an, Norberto Nigro. Short course on OpenFOAM development. ENIEF 2014. Instituto Balseiro - Bariloche, Argentina - September 2014 [Electronic resource]. — https://cimec.org.ar/foswiki/pub/Main/Cimec/CursoCFD/OF_Developers_Course.pdf (Date of the application 14.11.2019).

27. Bernhard F.W. Gschaider. README for swak4Foam [Electronic resource]. — https://openfoamwiki.net/images/e/e6/Swak4Foam_README.pdf (Date of the application 14.11.2019).

28. Дульнев Г.Н., Семьяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. — Л.: Энергия, 1968.

29. High Voltage LED Series Chip on Board. LC009D-Gen.2. Product Family Data Sheet, Rev.1.8, 2017.08.14. <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/SAMS/SAMS-S-A0003497324/SAMS-S-A0003497324-1.pdf>

Дата поступления рукописи
в редакцию 25.10.2019 г.

DOI: 10.15222/TKEA2019.5-6.25

УДК 536.24

І. В. СОБЯНІН, В. Є. ТРОФІМОВ

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: vovic@ukr.net

СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ВИРІШУВАЧА СИСТЕМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ OpenFOAM ДЛЯ АНАЛІЗА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ СВІТЛОДІОДНОГО СВІТИЛЬНИКА

Сьогодні в різних сферах людської діяльності все частіше застосовуються світлодіодні світильники, робота яких істотно залежить від теплової потужності розсіювання і температури. У зв'язку з цим, одним з обов'язкових етапів створення таких світильників є аналіз їхнього теплового режиму, необхідний для розробки конструкції тепловідводу.

В даній роботі для аналізу теплового режиму та розробки конструкції тепловідводу теплонавантажувального світлодіодного освітлювача синтезовано структуру вирішувача задачі, яка основана на структурі базового вирішувача *laplacianFoam* та функціях бібліотеки *swak4Foam* системи математичного моделювання OpenFOAM. Проведено порівняння результатів моделювання теплового режиму теплової моделі світлодіоду у вигляді пластини з прямокутним джерелом тепла, отриманих з використанням модифікованого вирішувача, вирішувача пропрієтарної CAD/CAE-системи SolidWorks і аналітичного рішення. Проведено оцінку адекватності даних, отриманих із застосуванням модифікованого вирішувача, і доведено можливість його практичного застосування.

Проведено аналіз теплового режиму світлодіоду Samsung LC009D, встановленого на тепловідводі, який представляє собою прямокутну пластину, одна з поверхонь якої має на собі прямі ребра. Проведено дослідження можливості використання у подібній конструкції шару клею марки Kaufer 5204 товщиною 0,1 мм теплопровідністю 1,5 Вт/(м·К) в умовах природного повітряного охолодження поверхонь тепловідводів з коефіцієнтом тепловіддачі 10 Вт/(м²·К). Наведено температурні поля світлодіода та тепловідвода і показано можливість ефективного використання запропонованого підходу для вирішення практичних задач, які виникають під час розробки світлодіодних освітлювачів.

Ключові слова: світлодіодний світильник (LED), тепловий режим, тепловідвід, CFD-моделювання, CAD/CAE-системи, OpenFOAM, *laplacianFoam*, *swak4Foam*.

SYNTHESISING SOLVER STRUCTURE
OF THE OpenFOAM MATHEMATICAL MODELING SYSTEM
FOR ANALYSING THERMAL MODE OF LED LAMPS

Today LED lamps are used more and more widely in various fields of human activity. The operation of LEDs substantially depends on the thermal dissipation power and temperature. In this regard, one of the mandatory stages in the process of creating such lamps is the analysis of their thermal mode, which is necessary for the development of a heat sink.

In order to analyze the thermal mode and design the heat sink for powerful LED lamps, the authors synthesized the structure of the problem solver. The new structure was based on the structure of the basic laplacianFoam solver and the application of the swak4foam library functions, which is a part of the OpenFOAM computational fluid dynamics toolbox. The results of the thermal mode simulation of the LED thermal model (a plate with a rectangular heat source) obtained using a modified solver were compared with those obtained by the proprietary solver of the CAD/CAE SolidWorks system and those obtained by analytical computation. The data adequacy of the modified solver was estimated and its practical application verified.

The thermal mode of the Samsung LC009D LED, which is placed on the flat-plate finned heat sink, was analyzed. The Kaufer 5204 glue ability to be used in such design with natural convection cooling of the heat sink was tested. The glue thickness was 0.1 mm and its thermal conductivity was 1,5 W/(m·K). The heat sink's heat transfer coefficient was 10 W/(m²·K). The paper presents corresponding temperature distributions and shows that the new technique can be used for solving problems that arise when designing LED lamps.

Keywords: LED lamp, thermal mode, heat sink, CFD simulation, CAD/CAE systems, OpenFOAM, laplacianFoam, swak4foam.

REFERENCES

1. Markova S., Turkin A. [Current applications of high-power LEDs]. *Solid-State Lighting Magazine*, 2016, no.3, pp. 56–62. <https://www.prosoft.ru/cms/f/468322.pdf> (Rus)
2. Yurtseven M.B., Mete S., Onaygil S. The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs. *Lighting Res. Technol.*, 2015, vol. 48, no. 8, pp. 943–965. <https://doi.org/10.1177/1477153515576785>
3. Schutt Ekaterina. Thermal management and design optimization for a high power LED work light. *Degree Thesis. ARCADE, Plastics Technology*, 2014, pp. 1–72. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/80460/Schutt_Ekaterina.pdf
4. *LED Thermal Management. LED professional Review*. 2009, iss. 13, pp. 1–64. https://www.led-professional.com/downloads/LpR_13_468932.pdf
5. *Thermal Management of Cree XLamp LEDs. Application Note*. Cree, Inc., 2019, 19 p. <https://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampThermalManagement.pdf>
6. Rait M. [LEDs in CSP packages for solid state lighting systems]. *CHIP NEWS Ukraine*, 2016, no. 6 (156), pp. 38–40. [http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20\(2\).pdf](http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20(2).pdf) (Rus)
7. Yusupov S. [LEDIL optics for modules with Flip-Chip LEDs]. *Sovremennaya Svetotekhnika*, 2015, no. 6, pp. 24–25. [http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/24\(1\).pdf](http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/24(1).pdf) (Rus)
8. Ying S. P., Shen W. B. Thermal analysis of high-power multichip COB light-emitting diodes with different chip sizes. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2015, vol. 62, no. 3, pp. 896–901. <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2390255>
9. Schneider M., Leyrer B., Herbold C., Maikowske S. High power density LED modules with silver sintering die attach on aluminum nitride substrates. *2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2014, pp. 203–208. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2014.6897289>
10. Wu Y., Tang Y., Li Z., Ding X., Yuan W., Zhao X., Yu B. Experimental investigation of a PCM-HP heat sink on its thermal performance and antithermal-shock capacity for high-power LEDs. *Appl. Therm. Eng.*, 2016, vol. 108, pp. 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.appltherm.2016.07.127>
11. Nikolaenko Yu.E., Kravets V.Yu., Naumova A.N. Baranyuk A.V. Development of the ways to increase the lighting energy efficiency of living space. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2017, vol.18, iss. 3, pp. 275–285. <https://doi.org/10.1615/InterJenerCleanEnv.2018021641>
12. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. Light characteristics of high-power LED luminaire with a cooling system based on heat pipe. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 366–371. <https://doi.org/10.15407/spqeo22.03.366>

13. Lozovoi M. A., Nikolaenko Yu. E., Rassamakin B.M., Khairnasov C. M. [Research on thermal characteristics of heat pipes for LED lightning devices]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2014, no. 5–6, pp. 32–38. <https://doi.org/10.15222/TKEA2014.2.32> (Rus)
14. Sobyenin I.V. [Solving the problem of determining the temperature field of a plate with a heat source in the OpenFOAM mathematical modeling system with the laplacianFoam solver]. *23rd International Youth Forum "Radioelectronics and Youth in the XXI century". Vol. 2.* Kharkiv National University of Radio Electronics, 2019, pp. 5–6. <https://nure.ua/wp-content/uploads/workshop/konferentsiia-avtomatyzovani-sistemy-ta-kompiuteryzovani-tekhnohii-radioelektronnoho-pryladobuduvannia-.pdf> (Rus)
15. ANSYS Multiphysics. *Thermal management* [Electronic resource]. <https://www.ansys.com/products/platform/multiphysics-simulation/thermal-management> (Date of the application 14.11.2019).
16. SOLIDWORKS Flow Simulation. *Heat conduction in solids* [Electronic resource]. <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation> (Date of the application 14.11.2019).
17. ELMER. *Application examples* [Electronic resource]. <https://www.csc.fi/web/elmer/application-examples> (Date of the application 14.11.2019).
18. COMSOL Heat Transfer Module [Electronic resource]. <https://www.comsol.com/heat-transfer-module> (Date of the application 14.11.2019).
19. OpenFOAM. *The open source CFD toolbox* [Electronic resource]. <http://www.openfoam.com> (Date of the application 14.11.2019).
20. Shekhovtsova V.I. [Selection problem and evaluation criteria for computer aided design] *Visnyk NTU "KHPI"*, 2014, no. 26 (1069), pp. 101–108. http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/9299/1/vestnik_HPI_2014_26_Shekhovtsova_Problema.pdf (Ukr)
21. Trofimov V. E., Pavlov A. L., Mamykin Y. G. CAD/CAE method of solving the hydrodynamic problem while developing powerful electronic devices. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 2, pp. 33–41. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.33>
22. OpenFOAM. *The open source CFD toolbox laplacianFoam* [Electronic resource]. <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-basic-laplacianFoam.html> (Date of the application 14.11.2019).
23. OpenFOAM. *The open source CFD toolbox chtMultiRegionFoam* [Electronic resource]. <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-heat-transfer-chtMultiRegionFoam.html> (Date of the application 14.11.2019).
24. Lazarev T.V. [Thermoelectric state simulation using OpenFOAM]. *Bulletin of NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Series "Chemical engineering, ecology and resource saving"*, 2013, no. 1, pp. 26–30. (Ukr)
25. M. de Groot. *Flow prediction in brain aneurysms using OpenFOAM*. September 2, 2014 [Electronic resource]. https://www.utwente.nl/en/eemcs/sacs/teaching/Thesis/masterthesis_meindert_de_groot.pdf (Date of the application 14.11.2019).
26. Juan Marcelo Gimenez, Axel Larreteguy, Santiago M'arquez Dami'an, Norberto Nigro. *Short course on OpenFOAM development. ENIEF 2014*. Instituto Balseiro, Bariloche, Argentina, September 2014 [Electronic resource]. https://cimec.org.ar/foswiki/pub/Main/Cimec/CursoCFD/OF_Developers_Course.pdf (Date of the application 14.11.2019).
27. Bernhard F.W. Gschaider. *README for swak4Foam* [Electronic resource]. https://openfoamwiki.net/images/e/e6/Swak4Foam_README.pdf (Date of the application 14.11.2019).
28. Dulnev G.N., Semyashkin E.M. *Teploobmen v radioelektronnykh apparatakh* [Heat transfer in electronic devices]. Leningrad, Energiya 1968, 360 p. (Rus)
29. *High Voltage LED Series Chip on Board*. LC009D–Gen.2. Product Family Data Sheet Rev.1.8, 2017.08.14, 15 p. <https://4donline.ihc.com/images/VipMasterIC/IC/SAMS/SAMS-S-A0003497324/SAMS-S-A0003497324-1.pdf>

Описание статьи для цитирования:

Собынин И. В., Трофимов В. Е. Синтез структуры решателя системы математического моделирования OpenFOAM для анализа теплового режима светодиодного светильника. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2019, № 5-6, с. 25–33. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.25>

Cite the article as:

Sobyenin I. V., Trofimov V. E. Synthesising solver structure of the OpenFOAM mathematical modeling system for analysing thermal mode of LED lamps. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 5-6, pp. 25–33. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.25>

Д. В. ПЕКУР¹, д. т. н. Ю. Є. НИКОЛАЄНКО², д. т. н. В. М. СОРОКІН¹

Україна, м. Київ, ¹Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: demid.pekur@gmail.com, yunikola@ukr.net, vsorokin@isp.kiev.ua

НОВА КОНСТРУКЦІЯ СВІТЛОДІОДНОГО СВІТИЛЬНИКА З ТЕПЛОВИМИ ТРУБАМИ

Запропоновано нову систему охолодження з тепловими трубами для забезпечення нормального теплового режиму світлодіодного джерела освітлення, яке можна використовувати у приміщеннях з низькими стелями. Дослідження системи проводились за допомогою комп'ютерного моделювання. Вони показали, що за потужності світельника 300 Вт температура основи в місці приєднання джерела світла не перевищує 67,6°C. За використання в зоні контакту шару теплопровідної пасти з коефіцієнтом теплопровідності 8,7 Вт/(м·°C) товщиною 0,1 мм це відповідає температурі корпусу 70,0°C. Якщо тепловий опір джерела світла становить 0,1°C/Вт, температура його напівпровідникових кристалів становитиме 100°C, що суттєво нижче припустимого значення температури, яке дорівнює 150°C. Загальний тепловий опір системи охолодження становить 0,159°C/Вт.

Ключові слова: світлодіодний світильник, тепла труба, система охолодження, комп'ютерне моделювання.

Проблема зміни клімату ставить перед людством задачу зменшення шкідливих викидів в атмосферу. Основною причиною збільшення шкідливих викидів та парникових газів в атмосфері є спалювання вугілля на теплових електростанціях з метою вироблення електричної енергії. Часткове вирішення цієї проблеми можливе за рахунок впровадження енергозберігаючих пристроїв та обладнання. Так, заміна традиційних джерел світла на більш ефективні світлодіодні може дозволити заощадити значну кількість електроенергії, що виробляється. З цією метою в останні роки активно розробляються і впроваджуються світильники, які споживають значно менше електроенергії, ніж лампи розжарювання, за умов випромінювання однакового світлового потоку [1]. При цьому, однак, зі збільшенням потужності світлодіода зростає і кількість теплоти, що виділяється в його напівпровідниковому кристалі, що зі свого боку призводить до підвищення температури кристалу і зниження надійності його роботи, зміні світлових і колірних характеристик [2]. Тому при розробці конструкцій світлодіодних освітлювальних пристроїв питанням забезпечення нормального теплового режиму світлодіодних джерел світла приділяється особлива увага [3]. Особливо актуальною стає задача підвищення ефективності системи охолодження, якщо в світильниках використовуються потужні багатокристалні світлодіодні джерела світла, так звані COB-матриці, виготовлені на основі технології COB (chip-on-board — чіп на

платі) [4]. Так, наприклад, COB-матриця типу CITIZEN CLU058, містить 648 кристалів компанії Nichia на платі розмірами 38×38×1,4 мм і має потужність до 526 Вт [4].

З метою охолодження потужних світлодіодних джерел світла застосовуються різні засоби тепловідведення: на основі радіаторів [5, 6], термоелектричних охолоджувачів [7], п'єзоелектричних вентиляторів [8], струменевих охолоджувачів [9], рідинних систем охолодження [10] та теплових труб [11–14]. Використання теплових труб для охолодження потужних світлодіодів в [11] здійснюється в комплексі з плавлячою речовиною, в [12,13] — сумісно з радіатором, що охолоджується вільною конвекцією оточуючого повітря, в [14] — в комплексі з радіатором, що обдувається вентилятором.

Системи тепловідведення на основі теплових труб (ТТ) і радіаторів з вільною конвекцією повітря — прості у виготовленні, не потребують енерговитрат на переміщення теплоносія і найбільш придатні для застосування в світлодіодних світильниках, призначених для внутрішнього освітлення приміщень, зокрема в багаторіжкових люстрах. Так, наприклад, у відомій конструкції такого освітлювального пристрою [12] каркас складається з п'яти вертикально розташованих вигнутих теплових труб, які одночасно є системою тепловідведення. На ТТ знизу, у зоні випаровування, встановлено світлодіодні джерела світла — модулі на основі COB-матриць, розміщені всередині світлороз-

сіюючих плафонів. У зоні конденсації ТТ закріплено пластинчасті радіатори, що охолоджуються природною конвекцією оточуючого повітря. Теплота, що виділяється світлодіодними модулями, ефективно відводиться тепловими трубами на достатню відстань і розсіюється в навколишнє повітря за допомогою пластинчастих радіаторів. Температура світлодіодних COB-матриць за потужності об'ємного модуля 26,7 Вт не перевищує 56°C, що свідчить про ефективність такої системи охолодження.

Разом з тим, певним недоліком світлодіодного освітлювального пристрою [12] є значні розміри за висотою, що не дозволяє застосовувати його для освітлення приміщень в низьких стелях.

Завданнями даної роботи була розробка потужного світлодіодного світильника з системою охолодження на основі теплових труб, який би мав невеликі розміри за висотою, та оцінка потенційних можливостей запропонованої системи охолодження забезпечувати нормальний тепловий режим світильника.

Конструкція світлодіодного світильника

Нову конструкцію світлодіодного світильника з тепловими трубами наведено на **рис. 1**. Світильник містить корпус 1, в якому розміщено драйвер 2 і до якого приєднано несучу основу 3, виконану з теплопровідного матеріалу, наприклад з міді або з алюмінієвого сплаву. На несучій основі 3 із забезпеченням теплового контакту встановлено принаймні одне потужне світлодіодне джерело світла 4 (наприклад, COB-матриця), закрите розсіювачем світла 5, прикріпленим до несучої основи. Навколо вертикальної осі світильника розташовано концентричні кільця 6, сукупність яких являє собою повітряний теплообмінник, а простір між кільцями утворює канали охолодження 7. Для передачі теплоти від джерела світла до теплообмінника використовуються теплові труби 8. Оскільки необхідну площу поверхні теплообміну можна отримувати за рахунок кількості кілець заданої висоти, на базі такої конструкції можна створювати світлодіодні світильники різної потужності невеликих за висотою розмірів.

Теплові труби з забезпеченням теплового контакту приєднуються до несучої основи зонами випаровування 9 (**рис. 2**), а зонами конденсації 10 встановлюються в отвори кілець 6 (циліндричної або іншої форми, також це можуть бути відкриті зверху пази). На внутрішній поверхні стінки корпусу ТТ виконано шар капілярної структури 11 у вигляді, наприклад, сітки або спеченого порошку, насиченого рідким теплоносієм. Теплові труби розташовуються переважно гори-

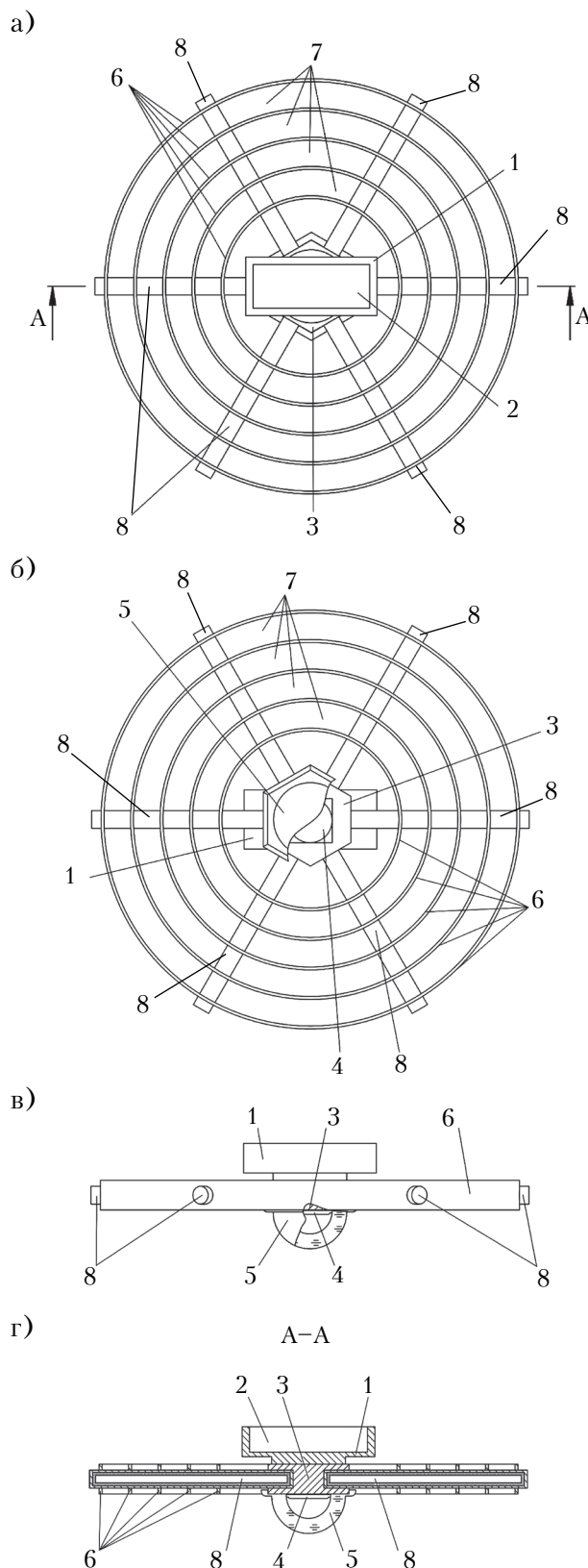


Рис. 1. Вид зверху (а), знизу (б) та спереду (в) світлодіодного світильника з тепловими трубами, а також його вертикальний переріз (г):

1 – корпус; 2 – драйвер; 3 – несуча основа; 4 – світлодіодне джерело світла; 5 – розсіювач світла; 6 – кільця; 7 – канали охолодження; 8 – теплові труби

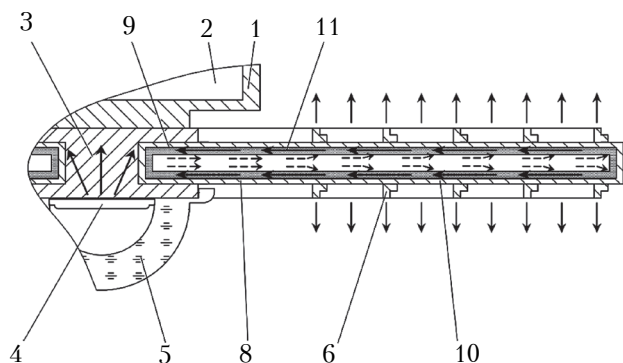


Рис. 2. Переріз фрагменту світлодіодного світильника з тепловою трубою у збільшеному масштабі:

9, 10 — зони випаровування та конденсації відповідно;
11 — шар капілярної структури (решту позицій див.
на рис. 1)

зонтально, в площині, перпендикулярній вертикальній вісі світильника.

Зазначимо, що в розглянутій конструкції світильника міститься шість теплових труб, але їхня кількість може бути іншою і залежить від результатів попередніх теплових розрахунків.

Корпус ТТ може бути виконаний з міді, і в такому випадку можна використовувати дистильовану воду як теплоносію, а також з алюмінієвого сплаву, сталі, нікелю, титану тощо, і тоді теплоносієм має бути вибрана корозійно сумісна з матеріалом рідина.

Функціонування запропонованого світлодіодного світильника в базовому варіанті виконання здійснюється наступним чином. При підключенні драйвера 2 до електричної мережі джерело 4 випромінює світло, і теплота, що виділяється при цьому в $p-n$ -переходах світлодіодів, передається завдяки теплопровідності несучої основи до зони випаровування ТТ і нагріває її корпус та шар капілярної структури. Рідкий теплоносіє, яким просочена капілярна структура, починає випаровуватися або кипіти (залежно від густини теплового потоку), інтенсивно поглинаючи при цьому підведену теплоту. Пара теплоносія рухається паровим простором ТТ в зону конденсації (показано пунктирними стрілками на рис. 2), де конденсується на її внутрішній поверхні, віддаючи при цьому теплоту пароутворення корпусу ТТ та з'єднанням з нею тепловим контактом кільцям. На теплообмінній поверхні кілець та поверхні ТТ в зоні конденсації теплота розсіюється природною конвекцією оточуючого повітря. Сконденсований теплоносіє завдяки дії капілярних сил повертається шаром капілярної структури до зони випаровування (показано довгими суцільними стрілками на рис. 2), і цикл передачі теплоти шляхом випаровування-конденсації теплоносія повторюється.

Для оцінки можливостей запропонованої системи охолодження забезпечувати нормальний тепловий режим потужного світлодіодного джерела світла скористаємось методом комп'ютерного моделювання. Такі методи широко використовуються для дослідження теплових полів засобів тепловідведення [15, 16] і дозволяють визначити розподіл температури світлодіодного пристрою без виготовлення вартісного експериментального зразка.

Умови для комп'ютерного моделювання

Об'єктом моделювання була система охолодження (несуча основа, шість теплових труб та повітряний теплообмінник) з COV-матрицею розмірами $38 \times 38 \times 1,4$ мм і тепловою потужністю 300 Вт. Корпус і драйвер вважались знятими з несучої основи та при моделюванні не враховувалися.

Несуча основа являє собою шестигранну пластину товщиною 8 мм, виготовлену з алюмінієвого сплаву (**рис. 3**). Відстань між її паралельними гранями становить 80 мм. В торцевих гранях основи виконано глухі циліндричні отвори діаметром 6 мм, глибиною 34 мм, в кожен з яких на всю глибину входить кінець теплової труби (зона випаровування).

Довжина теплових труб – 250 мм, діаметр – 6 мм, матеріал – мідь, капілярна структура – спечена порошкова, теплоносій – дистильована вода. Ефективну теплопровідність теплової труби було визначено за результатами попередніх експериментальних досліджень, вона дорівнює $10000 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$.

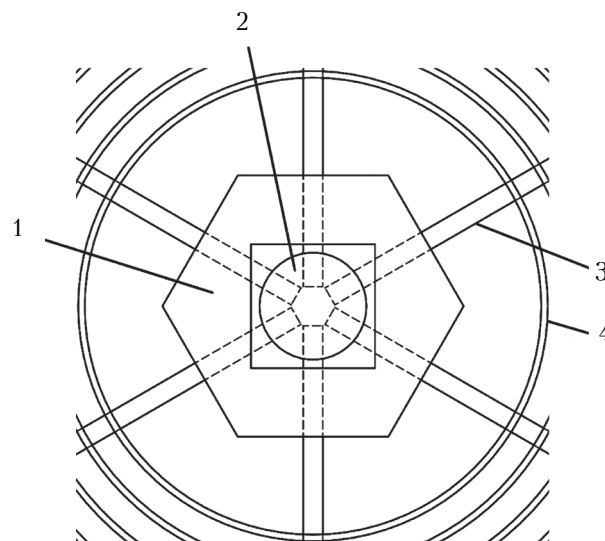


Рис. 3. Схема конструкції ділянки встановлення світлодіодного джерела світла:

1 – несуча основа; 2 – СОВ-матриця; 3 – теплова труба; 4 – перше кільце теплообмінника

Повітряний теплообмінник складається з кілець, в яких виконано отвори діаметром 6 мм для встановлення ТТ. Кількість кілець — 19, висота — 50 мм, матеріал — алюміній (АД31 ГОСТ 4784-97), відстань між сусідніми кільцями — 8 мм. Коефіцієнт теплопровідності несучої основи та ребер охолодження становить 237 Вт/(м·°C).

Загальні умови моделювання: теплові контакти теплових труб з елементами конструкції вважаються ідеальними; тепловим випромінюванням нехтують; навколишнє середовище — повітря; температура навколишнього середовища ($T_{н.с.}$) 20°C; швидкість переміщення середовища 0 м/с; атмосферний тиск 101,325 кПа.

З урахуванням вищенаведених геометричних характеристик в програмному комплексі SolidWorks було створено комп'ютерну модель системи охолодження, а з використанням модуля комплексу SolidWorks Flow Simulation було проведено чисельне моделювання розподілу температури в системі охолодження за теплової потужності СОВ-матриці 300 Вт та вказаних граничних умов.

Зазначимо, що вибір програмного комплексу SolidWorks пояснюється тим, що повна інтеграція Flow Simulation в SolidWorks дозволяє моделювати геометрію пристрою та виконувати всі розрахунки в одній програмі. Крім того, SolidWorks дає можливість довільно вибирати масиви результатів моделювання різних властивостей для експорту у числовому вигляді, що дозволяє проводити аналіз числових або графічних результатів. Комплекс задач, пов'язаних з питаннями теплообміну, в SolidWorks Flow Simulation вирішується за допомогою системи диференціальних рівнянь руху, нерозривності та теплопровідності [17, 18], що є досить складними для аналітичного використання.

Основними етапами розробки комп'ютерної моделі системи охолодження в SolidWorks Flow Simulation були наступні:

- створення 3D-моделі;
- завдання умов моделювання (властивості середовища та матеріалів, теплове навантаження, область моделювання та його деталізація);
- безпосереднє проведення моделювання;
- візуалізація полів температури елементів світильника та повітря, швидкості руху повітря тощо.

Результати комп'ютерного моделювання

На **рис. 4** зображено отримане за результатами комп'ютерного моделювання температурне поле системи охолодження, в **табл. 1** наведено значення температури в характерних місцях системи охолодження, а в **табл. 2** — розподіл

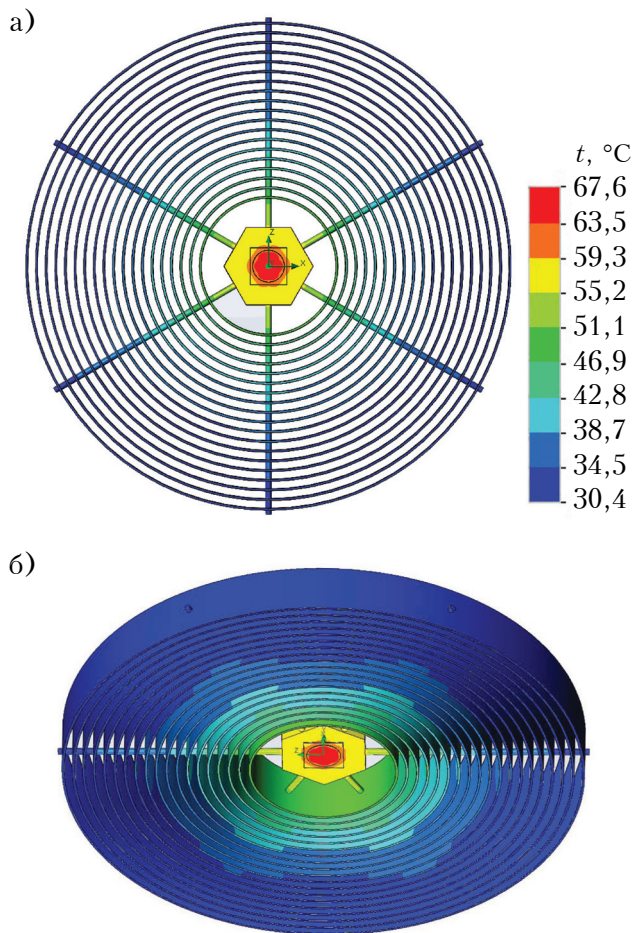


Рис. 4. Розподіл температури в системі охолодження світильника зі знятим розсіювачем світла:

а — вид знизу; б — аксонометричне зображення

Таблиця 1

Значення температури в характерних зонах системи охолодження ($T_{н.с.} = 20^\circ\text{C}$)

Зона системи охолодження	Температура, °C
Несуча основа в місці встановлення СОВ-матриці	67,6
Зовнішня поверхня розсіювача світла	36,1
Поверхня ТТ між несучою основою та першим кільцем	52,8
Віддалений кінець ТТ	33,9

температури у кільцях (T_{\max} , T_{\min} — значення температури у точках, розташованих на верхніх торцях кілець, відповідно, на відстані 1 мм від ТТ та посередині між сусідніми ТТ).

Як видно з наведених даних, максимальне значення температури знаходиться на несучій основі в місці приєднання джерела світла і становить 67,6°C. Якщо в зоні контакту використову-

Таблиця 2

Значення температури T_{\max} , T_{\min} на верхніх торцях кілець повітряного теплообмінника

Номер кільця	T_{\max} , °C	T_{\min} , °C
1	49,1	47,9
2	47,3	46,1
3	45,7	44,3
4	44,1	42,5
5	42,6	40,9
6	41,3	39,5
7	40,1	38,1
8	39,0	36,9
9	38,0	35,8
10	37,1	34,8
11	36,3	34,0
12	35,6	33,2
13	35,0	32,6
14	34,5	32,1
15	34,1	31,6
16	33,8	31,4
17	33,6	31,2
18	33,5	31,4
19	33,2	30,3

вати теплопровідну пасту (товщина шару 0,1 мм) Arctic Silver 5 з коефіцієнтом теплопровідності 8,7 Вт/(м·°C), температура корпусу становитиме 70°C. Якщо задати значення теплового опору джерела світла 0,1°C/Вт (такий тепловий опір має, наприклад, СОВ-матриця типу CITIZEN CLU058), то температура $p-n$ -переходів напівпровідникових кристалів складатиме приблизно 100°C, що значно нижче припустимого значення температури 150°C.

З табл. 2 видно, що з віддаленням кілець від зони нагріву (несучої основи з СОВ-матрицею) температура кілець від першого до тринадцятого зменшується практично лінійно в межах від 49,1 до 35,0°C, тобто на 14,1°C. Далі, від тринадцятого кільця до дев'ятнадцятого, зменшення їхньої температури відбувається значно повільніше — від 35,0 до 33,2°C, тобто на 1,8°C. Крім того, спостерігається нерівномірність температури вздовж одного кільця. Так, температура поверхні кільця між двома тепловими трубами змінюється на 1,2–2,9°C залежно від віддаленості кільця від несучої основи. З урахуванням цього, для визначення коефіцієнта тепловіддачі було розраховано середнє значення температури теплообмінної поверхні як серед-

не арифметичне всіх значень температури, вказаних в табл. 2, яке становило 37,6°C. За такої температури величина коефіцієнта тепловіддачі від поверхні кілець та теплових труб до оточуючого повітря природною конвекцією дорівнює 8,57 Вт/(м²·°C), що свідчить про досить високу ефективність тепловіддачі розробленої системи охолодження. (Для розрахунків сумарна площа поверхні теплообміну всіх кілець та прилеглих до них ділянок ТТ приймалася рівною 1,99 м².)

Загальний тепловий опір розробленої системи охолодження, визначений як відношення різниці максимального значення температури несучої основи в місці приєднання СОВ-матриці і температури оточуючого повітря до загальної потужності СОВ-матриці, становить 0,159°C/Вт.

Моделювання дозволило також отримати комплексну картину розподілу температурного поля системи охолодження та оточуючих потоків повітря (рис. 5).

Крім того, за результатами комп'ютерного моделювання отримано картину течії повітряних потоків навколо системи охолодження (рис. 6) та розподіл швидкості v повітряних струменів вздовж теплової труби в трьох місцях горизонтальної площини, яка проходить по верхніх торцях кілець (рис. 7).

З рис. 7 видно, що швидкість потоків повітря є найбільшою в ділянках теплообмінника, наближених до несучої основи. З віддаленням кілець від центральної частини світильника швидкість повітря в каналах охолодження зменшується. В обраній площині спостерігається досить рівномірний рух повітря в каналах між ТТ, тобто його швидкість в різних точках майже однакова, за виключенням потоків безпосередньо над ТТ. Наприклад, між першим та другим кільцями швидкість повітря у двох точках, розташованих між ТТ, досягає 0,21 м/с, а безпосередньо над ТТ вона не перевищує 0,15 м/с.

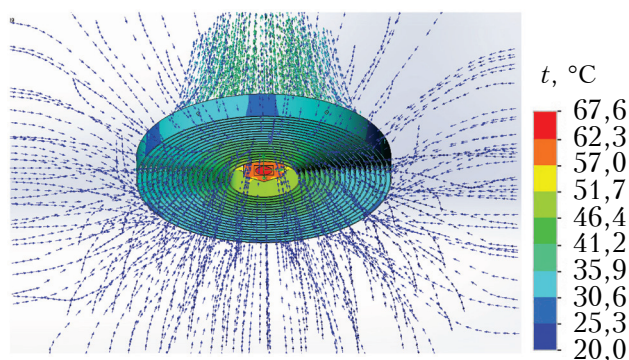


Рис. 5. Аксонометричне зображення температурного поля системи охолодження світильника без розсіявача світла та повітряних потоків навколо нього

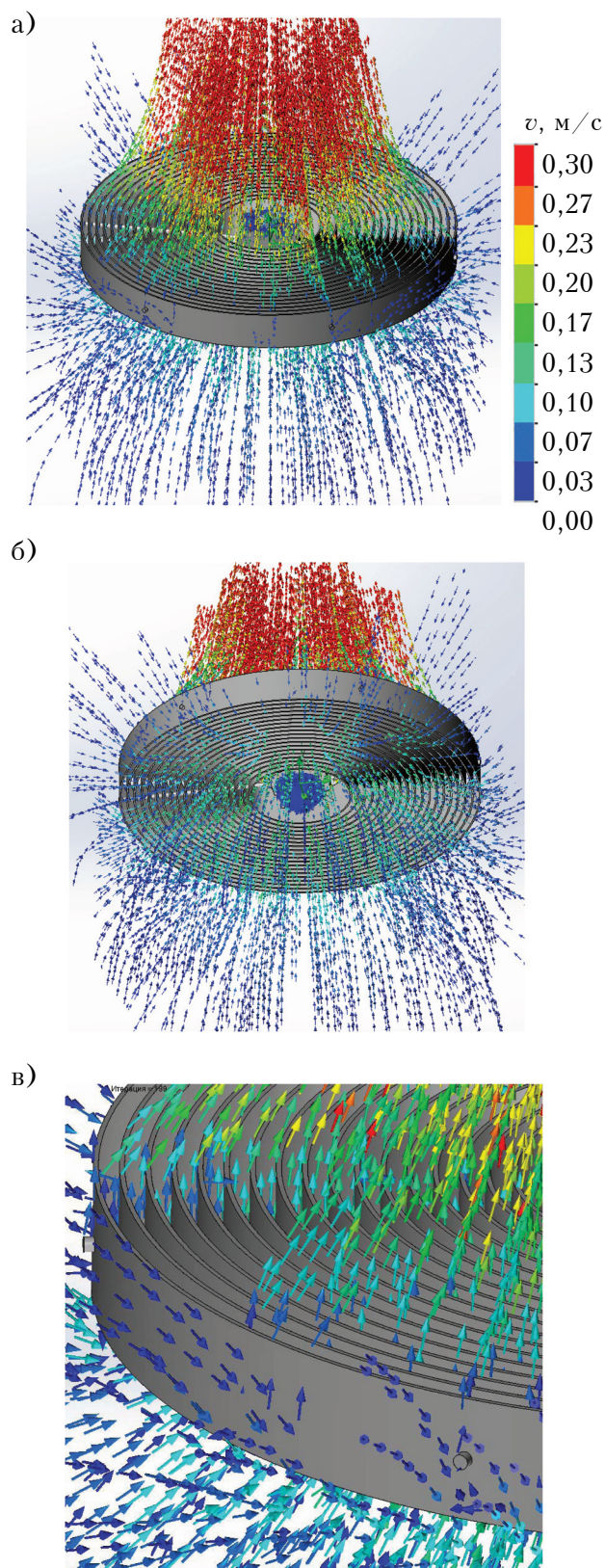


Рис. 6. Візуалізація траєкторії руху та швидкості повітряних потоків навколо системи охолодження з розсіювачем світла:

a — з нижнього положення; *б* — з верхнього положення; *в* — фрагмент у збільшеному масштабі

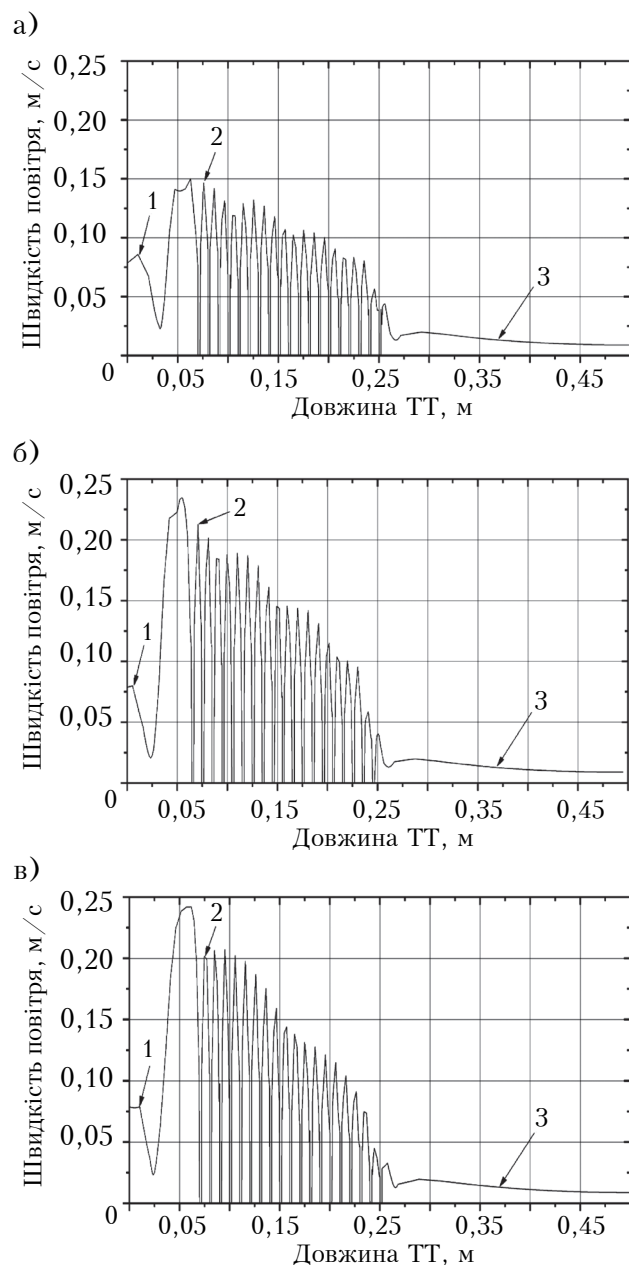


Рис. 7. Розподіл швидкості охолоджуючого повітря вздовж теплової труби в горизонтальній площині, яка проходить по верхніх торцях кілець, безпосередньо над ТТ (*a*), на відстані 10 мм від ТТ (*б*) та посередині між двома сусідніми ТТ (*в*):

(ділянка 1 відповідає потоку повітря над несучою основою; 2 — потоку між першим та другим кільцями; 3 — на віддалені від зовнішнього кільця)

Висновки

Дослідження запропонованої конструкції світлодіодного світильника методом комп'ютерного моделювання показали наступне.

За потужності світлодіодного джерела світла 300 Вт і температури оточуючого повітря 20°C температура ділянки несучої основи в місці приєднання джерела світла становить 67,6°C. Тепловий опір системи охолодження дорівнює

0,159°C/Вт. У разі використання COB-матриці типу CITIZEN CLU058 з тепловим опором 0,1°C/Вт і шару теплопровідної пасти типу Arctic Silver 5 в зоні контакту товщиною 0,1 мм температура $p-n$ -переходів кристалів матриці становитиме 100°C, тобто не буде перевищувати максимально припустиме значення 150°C. При цьому висота кілець світильника складає 50 мм.

Ефективне відведення теплоти забезпечується завдяки використанню в системі охолодження теплових труб. Оскільки ефективна теплопровідність ТТ на порядки вища за теплопровідність міді та алюмінію, вони мають значно менший тепловий опір, ніж металеві конструктивні елементи таких самих розмірів, тому ТТ дозволяють більш ефективно передавати теплоту від джерела світла до всіх кілець, незалежно від їхнього розташування. У такому випадку забезпечується надійна робота більш потужного, ніж у відомих конструкціях, джерела світла мінімальної висоти.

Розроблений потужний світлодіодний освітлювальний прилад з природнім повітряним охолодженням можна використовувати для освітлення приміщень з низькими стелями.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Полищук А., Туркин А. Деградация полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов // Компоненты и технологии. — 2008. — №2. — С. 25–28. — https://kit-e.ru/assets/files/pdf/2008_2_25.pdf
2. Yurtseven M.B., Mete S., Onaygil S. The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs // Lighting Res. Technol. — 2015. — Vol. 48, №8. — P. 943–965. — <https://doi.org/10.1177/1477153515576785>
3. Мельниченко А. Защита мощных светодиодов от перегрева // Электронные компоненты и системы. — 2005. — №12 (100). — С. 22–23.
4. Урсаки А. Развитие светодиодных модулей Chip-on-Board на примере эволюции матриц от компании Citizen Electronics // Современная светотехника. — 2018. — № 2. — С. 20–22. — [http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20\(3\).pdf](http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20(3).pdf)
5. Ying S. P., Shen W. B. Thermal analysis of high-power multichip COB light-emitting diodes with different chip sizes // IEEE Trans. Electron Devices. — 2015. — Vol. 62, №3. — P. 896–901. — <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2390255>
6. Пат. 107882 С2 України. Освітлювальний пристрій / Є.В. Чорний. 2015. — Бюл. № 4.
7. Wang Jing, Zhao Xin-Jie, Cai Yi-Xi, Zhang Chun, Bao Wei-Wei. Experimental study on the thermal management of high-power LED headlight cooling device integrated with thermoelectric cooler package // Energy Conversion and Management. — 2015. — Vol. 101. — P. 532–540. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.040>
8. Maaspuro Mika. Piezoelectric oscillating cantilever fan for thermal management of electronics and LEDs — A review // Microelectronics Reliability. — 2016. — Vol. 63. — P.342–353. — <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.06.008>
9. Deng Xiong, Luo Zhenbing, Xia Zhixun, Gong Weijie, Wan Lin. Active-passive combined and closed-loop control for the thermal management of high-power LED based on a dual synthetic jet actuator // Energy Conversion and Management. — 2017. — Vol. 132. — P. 207–212. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.034>
10. Schneider M., Leyrer B., Herbold C., Maikowski S. High power density LED modules with silver sintering die attach on aluminum nitride substrates // Presented at the 2014 I.E. 64th electronic components and technology conference (ECTC). — 2014. — P. 203–208. — <https://doi.org/10.1109/ECTC.2014.6897289>
11. Wu Y., Tang Y., Li Z. et al. Experimental investigation of a PCM-HP heat sink on its thermal performance and antithermal-shock capacity for high-power LEDs // Appl. Therm. Eng. — 2016. — Vol. 108. — P. 192–203. — <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.127>
12. Nikolaenko Yu.E., Kravets V.Yu., Naumova A.N. Baranyuk A.V. Development of the ways to increase the lighting energy efficiency of living space // International Journal of Energy for a Clean Environment. — 2017. — Vol. 18, iss. 3. — P. 275–285. — <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2018021641>
13. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. Light characteristics of high-power LED luminaire with a cooling system based on heat pipe // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2019. — Vol. 22, N 3. — P. 366–371. — <https://doi.org/10.15407/spqeo22.03.366>
14. Лозовой М.А., Николаенко Ю.Е., Рассамкин Б.М., Хайрмасов С.М. Исследование рабочих характеристик тепловых труб для светодиодных осветительных приборов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2014. — № 5–6. — С. 32–38. — <https://doi.org/10.15222/TKEA2014.2.32>
15. 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. — <https://doi.org/10.15222/TKEA2016.6.30>
16. 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. — <https://doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.30>
17. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В. и др. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2008.
18. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2012.

*Дата надходження рукопису
до редакції 25.10 2019 г.*

DOI: 10.15222/TKEA2019.5-6.34
УДК 536.248.2; 628.941.8

Д. В. ПЕКУР¹, Ю. Е. НИКОЛАЕНКО², В. М. СОРОКИН¹

Украина, Киев, ¹Институт физики полупроводников
им. В.Е. Лашкарёва НАН Украины,

²Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

E-mail: demid.pekur@gmail.com, yunikola@ukr.net,
vsorokin@isp.kiev.ua

НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА С ТЕПЛОВЫМИ ТРУБАМИ

Проблема изменения климата ставит перед человечеством задачу уменьшения вредных выбросов в атмосферу, основной причиной которых является сжигание угля на тепловых электростанциях для выработки электрической энергии. Частичное решение этой проблемы возможно за счет внедрения энергосберегающих устройств и оборудования, в том числе замены традиционных источников света на более эффективные светодиодные. При этом, однако, возникает проблема обеспечения их нормального теплового режима, поскольку с увеличением мощности светодиодов возрастает и количество теплоты, выделяющейся в их полупроводниковых кристаллах, что приводит к повышению температуры кристаллов и снижению надежности работы устройства. Особенно актуальной эта задача становится при использовании мощных многокристальных светодиодных источников света, так называемых COB-матриц, мощность которых уже сегодня превышает 500 Вт.

В данной работе представлена новая конструкция мощного светодиодного светильника для освещения помещений с низкими потолками. В качестве теплопередающих средств для отвода теплоты от светодиодного источника света к концентрически расположенным вокруг него кольцам теплообменника использованы тепловые трубы. Кольца теплообменника охлаждаются естественной конвекцией окружающего воздуха. С помощью компьютерного моделирования оценена способность предложенной системы охлаждения обеспечивать нормальный тепловой режим светодиодного источника света.

Результаты компьютерного моделирования температурного поля системы охлаждения светильника показали, что при мощности светодиодного источника света 300 Вт температура основания светильника в месте присоединения источника света не превышает 67,6°C. При использовании в зоне контакта теплопроводной пасты типа Arctic Silver 5 с коэффициентом теплопроводности 8,7 Вт/(м·°C) и толщине слоя пасты 0,1 мм это соответствует температуре корпуса источника света 70°C. Если тепловое сопротивление источника света составляет 0,1°C/Вт, то температура его полупроводниковых кристаллов достигает 100°C, что значительно ниже допустимого значения температуры, равного 150°C. Общее тепловое сопротивление системы охлаждения составляет 0,159°C/Вт.

Ключевые слова: светодиодный светильник, светодиод, тепловая труба, распределение температуры, распределение скорости.

DOI: 10.15222/TKEA2019.5-6.34
UDC 536.248.2; 628.941.8

D. V. PEKUR¹, Yu. E. NIKOLAENKO², V. M. SOROKIN¹

Ukraine, Kyiv, ¹V. E. Lashkaryov Institute
of Semiconductor Physics NAS of Ukraine;

²National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute"

E-mail: demid.pekur@gmail.com, yunikola@ukr.net,
vsorokin@isp.kiev.ua

NEW LED LAMP DESIGN WITH HEAT PIPES

The problem of climate change poses a challenge for humanity: it is necessary to reduce harmful emissions into the atmosphere, caused mainly by the burning of coal in thermal power plants. Partially, this problem can be solved by the use of energy-saving devices and equipment, including the replacement of traditional light sources with more efficient LEDs. This, however, causes the problem of ensuring normal thermal modes of the LEDs, since the more powerfull the LED is, the more heat is released in their semiconductor crystals, which leads to an increase in the temperature of the crystals and a decrease in the reliability of the device. This problem becomes especially urgent when using powerful multi-chip LED light sources, the so-called SOB matrices, whose power even now exceeds 500 W.

This article presents a new design of a powerful LED lamp for indoor illumination of rooms with low ceilings. The heat from the LED is transferred via heat pipes to the heat exchanger rings looped around the light

source. The heat exchanger rings are cooled by the natural convection of the surrounding air (at an ambient air temperature of 20°C). Computer simulation allowed evaluating the ability of the proposed cooling system to provide a normal thermal mode of the LED light source. The results on the computer simulations of the temperature field of light source's cooling system showed that when the LED power is 300 W, the temperature of the light source's base at the point where it is connected to the light source does not exceed 67.6°C. When the contact zone is covered with a 0.1 mm layer of heat-conducting paste (Arctic Silver 5 type) with a thermal conductivity coefficient of 8.7 W/(m·°C), the temperature of the LED case reaches 70°C. If the thermal resistance of the LED source is 0.1°C/W, then the temperature of its semiconductor crystals will be 100°C, well below the allowable temperature value of 150°C. The total thermal resistance of the cooling system is 0.159°C/W.

Keywords: LED lamp, LED, heat pipe, temperature distribution, speed distribution.

REFERENCES

- Polishchuk A., Turkin A. [The degradation of the semiconductor LEDs based on gallium nitride and its solid solutions]. *Komponenty i tekhnologii*, 2008, no. 2, pp. 25–28. https://kit-e.ru/assets/files/pdf/2008_2_25.pdf (Rus)
- Yurtseven M.B., Mete S., Onaygil S. The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs. *Lighting Res. Technol.* 2015, vol. 48, iss. 8, pp. 943–965. <https://doi.org/10.1177/1477153515576785>
- Melnichenko A. [Power LED protection against overheating]. *Elektronnye komponenty i sistemy*, 2005, no. 12(100), pp. 22–23. (Rus).
- Ursaki A. [Development of Chip-on-Board LED modules by the example of matrix evolution from Citizen Electronics]. *Sovremennaja svetotekhnika*, 2018, no. 2, pp. 20–22. [http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20\(3\).pdf](http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20(3).pdf) (Rus)
- Ying S. P., Shen W. B. Thermal analysis of high-power multichip COB light-emitting diodes with different chip sizes. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2015, vol. 62, no. 3, pp. 896–901. <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2390255>
- Chorny E.V. [Lighting device]. *Pat. 107882 C2 Ukaina*, 2015, bul. no 4. (Ukr)
- Jing Wang, Xin-Jie Zhao, Yi-Xi Cai et al. Experimental study on the thermal management of high-power LED headlight cooling device integrated with thermoelectric cooler package. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 101, pp. 532–540. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.040>
- Mika Maaspuro. Piezoelectric oscillating cantilever fan for thermal management of electronics and LEDs – A review. *Microelectronics Reliability*. 2016, vol. 63, pp. 342–353. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.06.008>
- Xiong Deng, Zhenbing Luo, Zhixun Xia et al. Active-passive combined and closed-loop control for the thermal management of high-power LED based on a dual synthetic jet actuator. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 132, pp. 207–212. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.034>
- Schneider M., Leyrer B., Herbold C., Maikowske S. High power density LED modules with silver sintering die attach on aluminum nitride substrates. *2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, pp. 203–208. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2014.6897289>
- Wu Y., Tang Y., Li Z. et al. Experimental investigation of a PCM-HP heat sink on its thermal performance and antithermal-shock capacity for high-power LEDs. *Appl. Therm. Eng.* 2016, vol. 108, pp. 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.127>
- Nikolaenko Yu.E., Kravets V.Yu., Naumova A.N. Baranyuk A.V. Development of the ways to increase the lighting energy efficiency of living space. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2017, vol. 18, iss. 3, pp. 275–285. <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2018021641>
- Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. Light characteristics of high-power LED luminaire with a cooling system based on heat pipe. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 366–371. <https://doi.org/10.15407/spqe22.03.366>
- Lozovoi M.A., Nikolaenko Yu.E., Rassamakin B.M., Khairnasov C.M. [Research on thermal characteristics of heat pipes for LED lighting devices]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2014, no. 5–6, pp. 32–38. <https://doi.org/10.15222/TKEA2014.2.32> (Rus)
- 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. <https://doi.org/10.15222/TKEA2016.6.30> (Rus)
- Trofimov V.E., Pavlov A.L., A.S. Storozhuk. [CFD-simulation of impact jet radiator for thermal testing of microprocessors]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 5–6, pp. 30–36. <https://doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.30> (Rus)
- Alayamovsky A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E.V. et al. *Komp'yuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike* [SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering practice]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2008.
- Alayamovsky A.A. *SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskiye zadachi* [SolidWorks Simulation. How to solve practical problems]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2012.

Опис статті для цитування:

Пекур Д. В., Ніколаєнко Ю. Є., Сорокін В. М. Нова конструкція світлодіодного світильника з тепловими трубами. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2019, № 5-6, с. 34–42. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.34>

Cite the article as:

Pekur D. V., Nikolaenko Yu. E., Sorokin V. M. New led lamp design with heat pipes. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 5-6, pp. 34–42. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.34>

А. И. КОНДРИК¹, д. ф.-м. н. Г. П. КОВТУН^{1, 2}

Украина, ¹ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины,

²Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ И СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ДЕТЕКТОРНЫЕ СВОЙСТВА CdTe и CdZnTe

С помощью компьютерного моделирования рассмотрено влияние легирующих и фоновых примесей, а также их скоплений на электрофизические и детекторные свойства $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 0,3$). Установлены примеси, снижающие эффективность сбора зарядов детекторов ионизирующих излучений на основе $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$. Установлены условия получения материалов CdZnTe приемлемого детекторного качества.

Ключевые слова: CdZnTe, примеси, детекторы, моделирование, глубокие уровни, сбор зарядов.

Твердотельные детекторы ионизирующих излучений, выполненные на основе высокоомных материалов, могут применяться в сфере контроля безопасности работы ядерных реакторов АЭС. В качестве детекторных материалов можно использовать полуизолирующие полупроводники. Важнейшими электрофизическими свойствами полупроводников, пригодных для детекторов ядерных излучений, являются подвижность электронов μ_n , удельное сопротивление ρ и время жизни неравновесных электронов τ_n и дырок τ_p , значения которых должны быть как можно больше. Весьма важной характеристикой детектора является эффективность сбора зарядов η . Для оптимальной регистрации гамма- и рентгеновских излучений необходимы детекторы на основе кристаллических материалов с большой атомной массой, поскольку эффективность регистрации гамма-квантов пропорциональна заряду ядра в степени n ($4 < n < 5$) [1, с. 48]. Такими материалами могут быть соединения на основе CdTe, например $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x < 0,3$). Высокоомные полупроводники CdTe и CdZnTe обладают очень хорошими электрофизическими свойствами: $\rho = 10^9 - 10^{11}$ Ом·см; $\mu_n = 10^3$ см²/(В·с); $\tau_{n,p} = 10^{-5} - 10^{-6}$ с, однако их широкому применению мешают некоторые проблемы, в числе которых — трудность точного измерения и контроля примесного и дефектного состава, который оказывает решающее влияние на свойства материалов. Кроме того, существует проблема достижения высокого спектрального разрешения и эффективности сбора зарядов детекторов. Также у разных производителей при использовании сходных технологий получают изделия с различным составом и характеристиками. К тому же у исследователей нет еди-

ного мнения относительно идентификации энергетических уровней примесей и дефектов в материалах CdZnTe.

Перечисленные трудности связаны с рядом причин. Во-первых, $Cd_{1-x}Zn_xTe$ спектроскопического качества должны обладать очень высоким удельным сопротивлением, что значительно затрудняет работу с ними. Во-вторых, детекторы на основе этих материалов при рабочей температуре ($T = 300$ К) могут иметь высокие поверхностные токи утечки [2–4]. В-третьих, при проведении измерений постоянно возникает проблема омичности контактов [5, 6]. Наконец, в высокоомных полупроводниках при $T = 300$ К в условиях сильной компенсации концентрация свободных носителей заряда на 5–6 порядков ниже, чем концентрация ионизованных примесных атомов и дефектов. В этом случае нарушается локальная электронейтральность в решетке и изменяется потенциал окружающего примесного атома, система находится в неравновесном состоянии, а под воздействием внешних факторов, например температуры, давления, меняется электронная структура дефектов решетки и условия взаимодействия дефектов с носителями заряда, перестраиваются глубокие уровни примесных атомов и дефектов. Это означает, что каждому квазиравновесному состоянию решетки соответствуют определенные энергетические уровни, поэтому в разных исследованиях, в зависимости от степени компенсации материала и условий эксперимента, примесные атомы могут вносить в запрещенную зону материала различные энергетические уровни [7].

Все описанные проблемы способны существенно исказить результаты измерений характеристик уровней, а также их идентификацию.

Авторами был проведен подробный анализ публикаций, посвященных экспериментальному исследованию свойств энергетических уровней в CdTe и CdZnTe, и определен типичный состав $Cd_{1-x}Zn_xTe$, который приводился разными исследователями (см., например, [8–10]).

Для получения монокристаллов детекторного качества требуется знание зависимостей электрофизических и детекторных свойств материала от содержания в нем примесей и структурных несовершенств. Учитывая трудности и проблемы, возникающие при экспериментальных исследованиях этих зависимостей, в качестве дополнительного инструмента можно применять моделирование с использованием хорошо апробированных физических моделей. Экспериментальные измерения скорости межзонной рекомбинации в широкозонных полупроводниках, в частности в CdTe [11], доказывают, что на время жизни неравновесных носителей заряда и, следовательно, на эффективность сбора зарядов в детекторах на основе этих материалов решающее влияние оказывает захват и рекомбинация электронов и дырок на глубоких уровнях примесей и дефектов. По этой причине наиболее приемлемой моделью для оценки времени жизни неравновесных носителей заряда в CdTe и CdZnTe можно считать теорию рекомбинации Шокли — Рида — Холла. Исследование влияния примесных элементов, содержащихся в исходных компонентах, и дефектов структуры, возникающих в процессе получения монокристаллов, на электрофизические и детекторные свойства CdZnTe поможет подобрать режимы технологических процессов глубокого рафинирования Cd, Zn, Te и определить оптимальные условия выращивания детекторного материала, поскольку уже известны технологические приемы, позволяющие в определенной мере управлять содержанием электрически активных примесей и собственных дефектов [12–14].

Целью настоящей работы было исследование методом компьютерного моделирования характера воздействия фоновых примесей и структурных дефектов на электрофизические и детекторные свойства $Cd_{1-x}Zn_xTe$.

Модель для исследований и исходный состав образцов

В основу расчетов была положена многоуровневая модель компенсации, которая выражается уравнением электронейтральности для произвольного количества примесей и дефектов:

$$n_0 - p_0 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{m_i} G N_i (j - m_i) + N_a - N_d = 0, \quad (1)$$

$$\text{где } G = \frac{g_{ij} \exp \left[\beta \left(jF - \sum_{s=1}^j \varepsilon_{is} \right) \right]}{g_{io} \left\{ 1 + \sum_{s=1}^{m_i} \frac{g_{is}}{g_{io}} \exp \left[\beta \left(sF - \sum_{r=1}^s \varepsilon_{rs} \right) \right] \right\}};$$

n_0, p_0 — концентрация свободных электронов и дырок;

N — суммарное количество примесей и дефектов (центров);

N_i, m_i — концентрация и зарядовое состояние i -го центра;

d_i, a_i — количество донорных и акцепторных уровней i -го центра, $d_i + a_i = m_i$;

ε_{ij} — j -й уровень энергии i -го центра, $1 \leq j \leq m_i$;

r, s — индексы суммирования;

N_a, N_d — суммарные концентрации мелких акцепторов и мелких доноров;

g_{ij} — кратность вырождения j -го уровня примеси или дефекта сорта i ;

g_{io} — кратность вырождения основного уровня i -го центра;

F — положение уровня Ферми;

$\beta = 1/(kT)$;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура.

Модель компенсации, описываемая уравнением (1), позволяет проводить количественные расчеты концентрации свободных носителей заряда для полупроводника, в матрице которого находится N мелких и глубоких многозарядных центров.

Анализ уравнения (1) показывает, что оно всегда имеет единственное решение, поэтому решалось численно относительно уровня Ферми методом дихотомии с последующим вычислением концентраций свободных носителей заряда:

$$n_0 = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2} \times \quad (2)$$

$$\times \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{\sqrt{x} dx}{1 + \exp[\beta(x - F + E_c)]},$$

$$p_0 = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2} \times \quad (3)$$

$$\times \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{\sqrt{x} dx}{1 + \exp[\beta(x + F - E_v)]},$$

где m_n, m_p — эффективная масса электронов и дырок;

E_c, E_v — значения энергии дна зоны проводимости и потолка валентной зоны;

h — постоянная Планка.

Концентрация ионизованных и нейтральных центров вычислялась как произведение концентрации соответствующего i -го центра на вероятность f_{ij} того, что на нем находится j электронов:

$$f_{ij} = Ag_{ij} \exp \beta \left(jF + \sum_{s=1}^j \varepsilon_{is} \right),$$

$$\text{где } A = \left[1 + \sum_{s=1}^{m_i} \frac{g_{ij}}{g_{i0}} \exp \beta \left(sF + \sum_{j=1}^s \varepsilon_{ij} \right) \right]^{-1}.$$

При этом заряд i -го центра равен $-e(j-d_i)$, поскольку для одно-, двух-, трехзарядного донора $d_i = 1, 2, 3$, а для соответствующих акцепторных центров $d_i = 0$.

Подвижность электронов μ_n определялась в τ -приближении с учетом различных механизмов рассеяния:

$$\frac{1}{\tau} = \sum_k \frac{1}{\tau_k},$$

где τ_k — характерное время релаксации импульса для отдельных механизмов рассеяния.

Исследования проводили с учетом механизмов рассеяния на ионизованных и нейтральных центрах, акустических фононах, пьезоэлектрических фононах, неполярных оптических фононах при использовании соответствующих моделей из [15, глава VI], без учета искажений и поляризаций решетки. Парциальную подвижность при рассеянии на полярных оптических фононах рассчитывали по формуле (7) из [16]. Модель для расчета парциальной подвижности μ_{sc} при рассеянии на неоднородностях легирования взята из [17]:

$$\mu_{sc} = \frac{e}{N_s A (2km_n T)^{1/2}},$$

где N_s — концентрация кластеров;

B — эффективная площадь поперечного сечения рассеяния кластера.

Итоговое выражение для расчета подвижности электронов выглядит следующим образом:

$$\mu_n = \left(\frac{300m_n \int_0^\infty E^{3/2} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE}{e \int_0^\infty E^{3/2} \left(\sum_k \frac{1}{\tau_k} \right)^{-1} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE} + \sum_l \frac{1}{\mu_l} \right)^{-1}.$$

Здесь индекс k указывает на механизмы, для которых принятые модели определяют время релаксации импульса, а индекс l — на те, что описывают парциальную подвижность в аналитическом виде.

Подвижность дырок μ_p принималась неизменной и равной $70 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Затем вычислялось удельное сопротивление

$$\rho = \frac{1}{e(n_0 \mu_n + p_0 \mu_p)}.$$

Время жизни неравновесных носителей заряда определялось по модели Шокли — Рида — Холла [15, с. 310–316], эффективность сбора зарядов детектора — по уравнению Хехта [1, с. 489]

$$\eta(d_0) = \frac{\mu_n U \tau_n}{L^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{(L-d_0)L}{\mu_n U \tau_n}\right) \right] + \frac{\mu_p E \tau_p}{L} \left[1 - \exp\left(-\frac{L d_0}{\mu_p U \tau_p^+}\right) \right], \quad (4)$$

где L — расстояние между электродами;

τ_n, τ_p — среднее время дрейфа, соответственно, неравновесных электронов и дырок, которое приравнивалось к среднему времени жизни неравновесных носителей заряда;

d_0 — координата точки возникновения неравновесных носителей заряда, отсчитываемая от катода;

U — напряжение между электродами детектора.

Модели позволяют вычислять $\mu_n, \rho, \tau_n, \tau_p$, эффективность сбора зарядов η . Вводными параметрами при этом служат опубликованные в технической литературе экспериментально измеренные характеристики: состав и концентрация примесей и дефектов, положения их уровней энергии в запрещенной зоне, сечение захвата этими уровнями неравновесных носителей заряда.

Достоверность принятого подхода получила хорошее подтверждение при сравнении результатов моделирования с хорошо известными экспериментальными данными по величинам ρ, μ_n для CdTe и CdZnTe , а также с результатами работ [18–20]. Это можно увидеть на **рис. 1**, где приведены результаты вычислений, выполненных в рамках принятых моделей, и эксперимента, проведенного на образце $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ в [19].

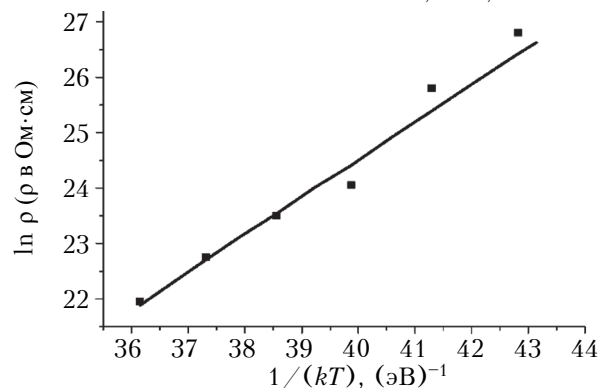


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}:\text{In}$ от $1/(kT)$, полученная при вычислениях в рамках принятых моделей (точки — экспериментальные данные [19])

Типичный состав образцов CdTe и Cd_{1-x}Zn_xTe [9, 10]

Уровень	N _d (Cl)	Ag _{Cd}	As _{Te}	P _{Te}	V _{Cd} ⁻ Cl _{Te}	V _{Cd} ⁻ related	V _{Te} ⁻ related	Zn- related	V _{Cd} ²⁻	V _{Te} ⁺	H ₁ ⁺	H ₂ ²⁻
Концентрация, 10 ¹⁴ см ⁻³	см. рис. 2	50	50	50	5	5	10	50	10	35	200	8

При вычислениях было получено $\tau_n \approx \tau_p \approx 10^{-6}$ с, что совпадает с хорошо известными значениями этих величин для CdTe и Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te. В [19] методом кривых Аррениуса определено положение уровня Ферми F , равное 0,73 эВ, а в результате численного решения уравнения (1) относительно F , было получено значение 0,74 эВ. Таким образом, правомочность применения принятых моделей для количественных исследований электрофизических свойств Cd_{1-x}Zn_xTe ($0 \leq x \leq 0,3$) очевидна.

Достоверность результатов исследований детекторных свойств находится в пределах применимости уравнения (4), которое учитывает захват неравновесных носителей заряда на уровнях ловушек, но не учитывает тот факт, что некоторая их часть может высвобождаться с этих уровней путем эмиссии в соответствующие зоны.

В запрещенной зоне Cd_{1-x}Zn_xTe обычно присутствует глубокий уровень донора. Согласно современным представлениям это может быть теллур на месте кадмия Te_{Cd} или же теллур в междоузлии Te(I). Также есть вакансии теллура V_{Te}, акцепторные уровни вакансий кадмия V_{Cd} и вакансий цинка V_{Zn}. Кроме того, имеются мелкие акцепторные уровни комплексов V_{Cd} с примесями, а также мелкие акцепторные уровни примесей замещения Ag_{Cd}, As_{Te}, P_{Te}. Для компенсации акцепторных уровней и достижения высокоомного состояния материал легируется одним из мелких доноров, таких как Cl, I, In, Al. Типичный состав образцов CdTe и CdZnTe, представлен в **таблице** (здесь сохранены обозначения, использованные в [9, 10]). Аналогичные данные были также опубликованы в [8] и в некоторых других работах.

В ряде работ (см., например, [9]) экспериментально зарегистрированы фоновые примеси (Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Sn, Pb, Ge), которые могут содержаться в исходных компонентах и загрязнять матрицу Cd_{1-x}Zn_xTe при его получении. Эти примеси, за исключением Cr, выступают в роли глубоких доноров.

Результаты моделирования электрофизических и детекторных свойств

Материал детекторного качества в первую очередь должен обладать высоким удельным сопротивлением, поэтому сначала было смоделировано поведение ρ в зависимости от концентрации (N_{DD}) и энергии (E_{DD}) глубокого доно-

ра. Было установлено, что в образовании области высокоомного состояния важную роль играет глубокий донор и что для достижения значения $\rho \approx 10^{10}$ Ом·см в CdTe и Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te необходимо присутствие глубокого донора с энергией $E_{DD} \approx 0,8$ эВ. Установлено также, что характер поведения удельного сопротивления материалов Cd_{1-x}Zn_xTe при $0 \leq x \leq 0,3$ качественно сходен, различия заключаются только в величине ρ .

Из анализа **рис. 2, а, в** видно, что увеличение в пять раз концентрации глубокого донора $N(X)$ приводит к существенному расширению области высокоомного состояния. В ряде опубликованных экспериментальных работ (см., например, [8, 10, 17]) отмечается, что кроме примесей (M) в качестве глубокого донора (X) могут выступать также антиструктурные дефекты: теллур на месте кадмия Te_{Cd}, теллур в междоузлии Te(I) или их комплексы с примесями $M - \text{Te}_{\text{Cd}}$, $M - \text{Te}(I)$. Большое удельное сопротивление полупроводников достигается при выполнении условий компенсации некомпенсированной части акцепторов ионизированными глубокими донорами, т. е. при выполнении условия $N_{DD}^+ > (N_{DA}^- - N_D^+ + N_A^-)$, где N_{DD}^+ , N_{DA}^- — суммарные концентрации ионизированных глубоких доноров и акцепторов, N_D^+ , N_A^- — то же самое для мелких доноров и акцепторов.

Анализ **рис. 2, б, г** показывает, что в условиях предполагаемого в модели однородного распределения примесей по объему кристалла существенное (на порядок) увеличение концентрации примесей вплоть до $5 \cdot 10^{16}$ см⁻³ не вызывает значительного изменения подвижности электронов μ_n . Кроме того, ее величина близка к известному значению $\mu_n \approx 10^3$ см²/(В·с). Однако, как видно из **рис. 3**, на подвижность электронов весьма заметно влияет скопление примесей, и при $T = 300$ К, т. е. при рабочей температуре детектора, увеличение концентрации примесных кластеров на порядок приводит к тому, что значение μ_n снижается в разы. Кроме того, примесные кластеры деформируют кристаллическую решетку (с эффектом поляризации), что, очевидно, приведет к еще большему снижению μ_n . Аналогичным образом на подвижность электронов влияют искажающие решетку скопления дефектов.

Фоновые примеси влияют не только на электрофизические свойства CdZnTe, но и на детек-

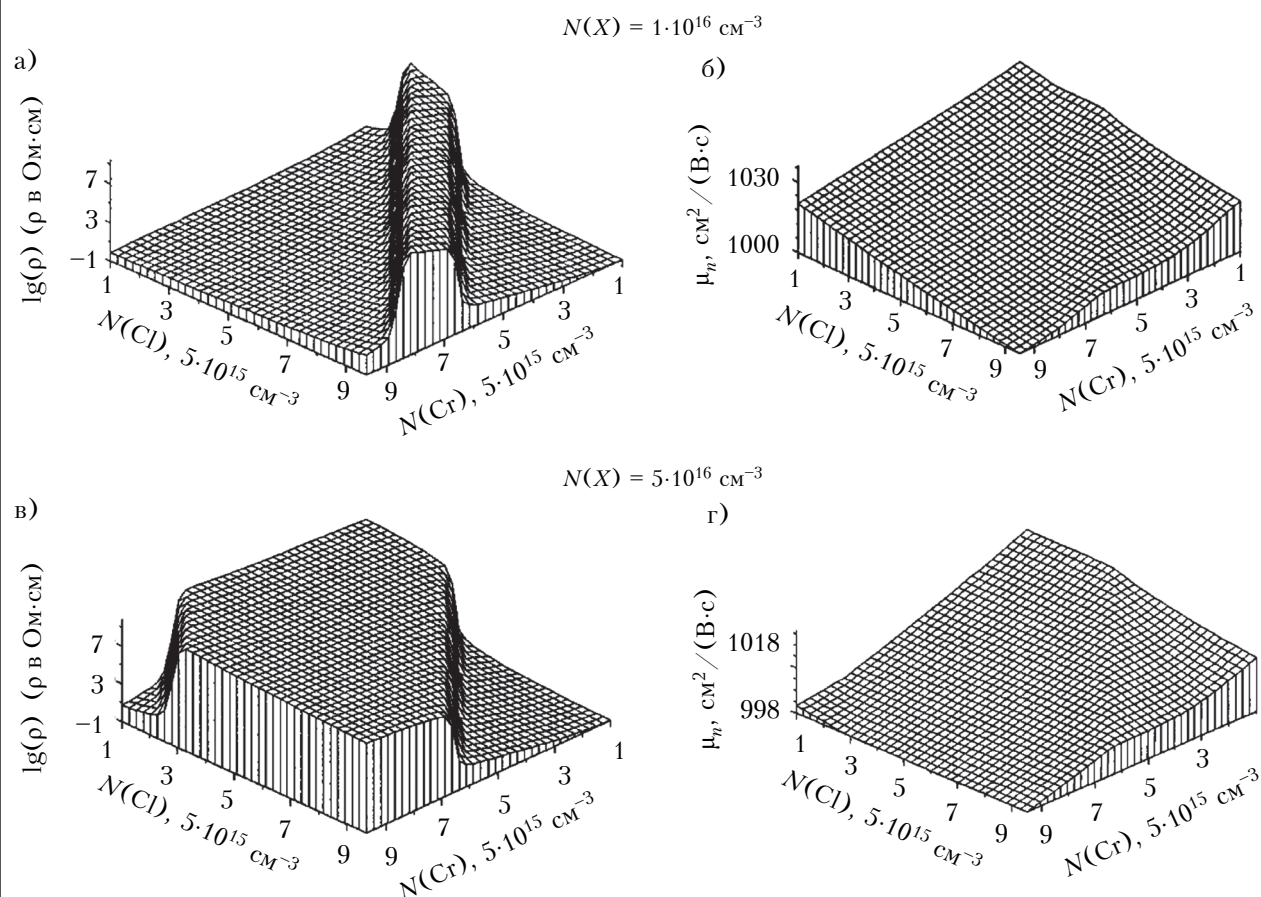


Рис. 2. Зависимости удельного сопротивления ρ (а, в) и подвижности электронов μ_n (б, г) CdTe от концентрации легирующей примеси $N(\text{Cl})$ и фоновой примеси $N(\text{Cr})$, полученные при разной концентрации фоновой примеси $N(X)$ с энергией 0,8 эВ

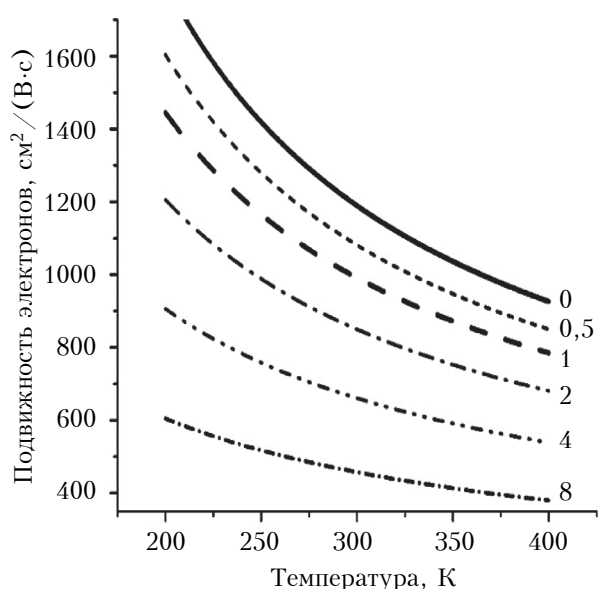


Рис. 3. Температурные зависимости подвижности электронов μ_n в $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ при различных значениях концентрации примесных кластеров с поперечным сечением $1 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$ (концентрация кластеров указана возле кривых, ед. изм. « 10^{11} cm^{-3} »)

торные. Это продемонстрировано на рис. 4, а, где видно, что заметно ухудшают эффективность сбора зарядов детектора η такие примеси, как Ti, V, Ge, Ni, Sn. Судить о причинах такого ухудшения детекторных свойств можно из анализа рис. 4, б, который показывает, что при загрязнении кристалла примесями Cr, Co, V и Sn уровень Ферми проходит вблизи энергетического уровня вакансии кадмия V_{Cd} , на котором и происходит захват и рекомбинация неравновесных носителей заряда. По сравнению с другими структурными дефектами именно вакансии кадмия особенно сильно ухудшают эффективность сбора зарядов, что соответствует общепринятым представлениям. При этом на величину η оказывает также влияние захват и рекомбинация неравновесных зарядов на уровнях Ti, V, Ge, Ni, Sn, но это влияние значительно меньше, чем на уровне V_{Cd} .

Порядок величины концентрации фоновых примесей и дефектов, измеренной в [20], составляет $10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Моделирование показало, что детекторные свойства материала заметно ухудшаются при концентрации вредных приме-

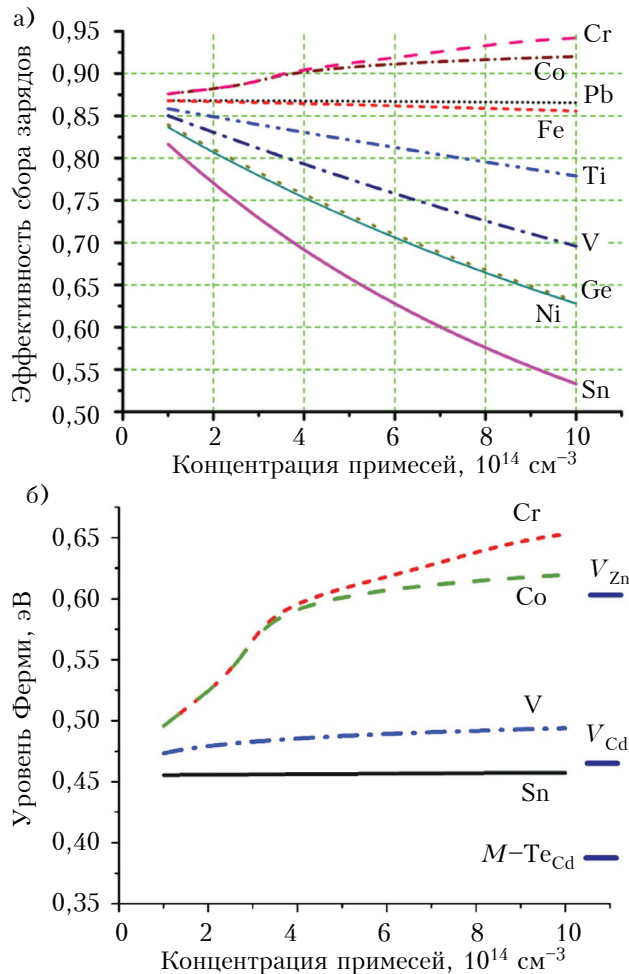


Рис. 4. Зависимость эффективности сбора заряда детектора (а) и уровня Ферми (б) в $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}:\text{Al}$ от содержания фоновых примесей (состав образца для моделирования взят из [21] для необлученного материала)

сей выше $(1-2) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, а их предельная концентрация (выше которой заметно падает эффективность сбора зарядов) увеличивается с увеличением концентрации остальных фоновых примесей и дефектов, что объясняется совокупным влиянием всех фоновых примесей на уровень Ферми. Таким образом, если технологии рафинирования и выращивания позволяют получить кристалл CdZnTe с определенной концентрацией «фона», то следует позаботиться о том, чтобы содержание перечисленных вредных примесей не превышало указанного фонового уровня, а еще лучше — было ниже его.

Заключение

Проведенные исследования показали, что фоновые примеси и дефекты, выполняющие роль глубоких доноров, расширяют высокоомную область и увеличивают удельное сопротивление $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 0,3$) при увеличении их энергии в запрещенной зоне относительно дна

зоны проводимости вплоть до 0,8 эВ для CdTe и $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$. Для получения CdTe и CdZnTe с хорошими электрофизическими свойствами необходимо стремиться получить материал с однородным распределением по объему примесей (примесных кластеров) и дефектов, поскольку это существенно влияет на подвижность электронов в исходном $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. В таком случае их суммарная концентрация может достигать 10^{16} см^{-3} без заметного снижения подвижности электронов. При этом следует понизить содержание фоновых примесей Ag, P, As — в таком случае высокоомного состояния материала можно достичь при меньшем количестве легирующего мелкого донора (Cl, I, In, Al), присутствие которого способствует образованию комплексов, приводящих к снижению удельного сопротивления.

С целью улучшения детекторных свойств исследованных материалов необходимо увеличить эффективность сбора заряда, которая зависит от времени жизни неравновесных электронов. Поскольку последнее связано с рекомбинацией неравновесных электронов на вакансиях кадмия V_{Cd} [11], следует снизить концентрацию V_{Cd} , а также фоновых примесей Ti, V, Ni, Cr, Sn, поскольку они смещают уровень Ферми в окрестность энергетического уровня V_{Cd} , заметно увеличивая рекомбинацию на нем. При этом следует учитывать, что облучение детекторов на основе CdTe и CdZnTe приводит к повышению содержания вакансий кадмия и вакансий цинка, которые могут образовывать комплексы с легирующими и фоновыми примесями. Уровни энергии таких комплексов находятся вблизи валентной зоны, и при больших дозах облучения уровень Ферми смещается в направлении к ней, вследствие чего заметно снижается удельное сопротивление и появляются большие токи утечки.

Приведенные рекомендации направлены на помощь технологам в получении CdTe и CdZnTe высокого детекторного качества.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Glenn F. Knoll Radiation detection and measurement. — John Wiley & Sons, Inc., 2010.
2. Pekarek J., Belas E., Zazvorka J. Long-term stable surface treatments on CdTe and CdZnTe radiation detectors // Journal of Electronic Materials. — 2017. — Vol. 46, № 4. — P. 1996–2002. — <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-016-5065-5>
3. Kim K. H., Hwang S., Fochuk P., Nasi L. et al. The effect of low-temperature annealing on a CdZnTe detector // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2016. — Vol. 63, № 4. — P. 2278–2282. — <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2016.2583546>
4. Reihon M., Franc J., Zazvorka J., Dedic V. Influence of low temperature annealing on Schottky barrier height and surface electrical properties of semiinsulating CdTe // Semiconductor Science and Technology. — 2017. — Vol. 32, № 8. — P. 085007–1–6. — <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6641/aa7500>

5. Bell S. J., Baker M. A., Duarte D. D., Schneider A. et al. Performance comparison of small-pixel CdZnTe radiation detectors with gold contacts formed by sputter and electroless deposition // Journal of Instrumentation. — 2017. — Vol. 12. — P. 06015–1–10. — <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/06/P06015>
6. Bell S. J., Baker M. A., Duarte D. D. et al. Characterization of the metal semiconductor interface of gold contacts on CdZnTe formed by electroless deposition // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2015. — Vol. 48. — P. 275304–275317. — <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/48/27/275304>
7. Садуллаев А. Б. Состояние примесных атомов с глубокими уровнями в полупроводниках в условиях сильной компенсации // Молодой ученый. — 2011. — Т. 1, № 12. — С. 48–50. — <https://moluch.ru/archive/35/3956/>
8. Ruihua Nan, Tao Wang, Gang Xu, Man Zhu, Wanqi Jie. Compensation processes in high-resistivity CdZnTe crystals doped with In/Al // Journal of Crystal Growth. — 2016. — Vol. 451. — P. 150–154. — <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.07.032>
9. Hofmann D. M., Stadler W., Christmann P., Meyer B. K. Defects in CdTe and $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. — 1996. — Vol. 380, iss. 1–2. — P. 117–120. — [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00287-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00287-2)
10. Castaldini A., Cavallini A., Fraboni B. et al. Deep energy levels in CdTe and CdZnTe // J. Appl. Phys. — 1998. — Vol. 83, iss. 4. — P. 2121–2126.
11. Novikov G. F., Radychev N. A. Experimental determination of the dependence of the free electron-hole recombination rate constant on the band gap in semiconductors of the $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{VI}}$ and $\text{A}^{\text{I}}\text{B}^{\text{VII}}$ types // Russian Chemical Bulletin. — 2007. — Vol. 56, № 5. — P. 890–894. — <https://doi.org/10.1007/s11172-007-0134-9>
12. Колобов Г.А., Карпенко А.В. Рафинирование легких редких, редкоземельных и радиоактивных металлов // Вопросы атомной науки и техники. — 2016. — № 1. — С. 3–9.
13. Девярых Г. Г. Разработка высококачественных материалов // В сб.: Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. — Київ: Наукова думка, 1998.
14. Ажажа В. М., Ковтун Г. П., Неклюдов И.М. Комплексный подход к получению высококачественных материалов для электроники // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2002. — № 6. — С. 3–6.
15. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. — Москва: Наука, 1990.
16. Segall B., Lorenz M.R., Halsted R.E. Electrical Properties of *n*-Type CdTe // Physical Review. — 1963. — Vol. 129, № 6. — P. 2471–2481.
17. Faulkner R. A. Toward a Theory of Impurities in Semiconductors // Physical Review. — 1968. — Vol. 175, № 3. — P. 991–1009. — <https://doi.org/10.1103/PhysRev.175.991>
18. Wolf C. M., Stillman G. E., Lindley W. T. Electron mobility in high-purity GaAs // Journal of Applied Physics. — 1970. — Vol. 41, № 7. — P. 3088. — <https://doi.org/10.1063/1.1659368>
19. Ruihua Nan, Wanqi Jie et al. Determination of trap levels in CdZnTe:In by thermally stimulated current spectroscopy // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. — 2012. — Vol. 22. — P. 148–152. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61700-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61700-2)
20. Zumbiehl A., Fougères P., Hage-Ali M et al. Resistivity simulation of CdZnTe materials // Journal of Crystal Growth. — 1999. — Vol. 197. — P. 670–674.
21. Ruihua Nan, Wanqi Jie, Gangqiang Zha et al. Irradiation-Induced Defects in $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ // Journ. Electronic Materials, 2012. — Vol. 41, № 11. — P. 2044–2049. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-012-2204-5>

Дата поступления рукописи
в редакцию 21.01 2019 г.

DOI: 10.15222/ТКЕА2019.5-6.43
УДК 621.315.592.3

О. І. КОНДРИК¹, Г. П. КОВТУН^{1,2}

Україна, м. Харків, ¹ІНЦ «ХФТІ» НАН України,
²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ВПЛИВ ДОМІШОК І СТРУКТУРНИХ ДЕФЕКТІВ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТА ДЕТЕКТОРНІ ВЛАСТИВОСТІ CdTe ТА CdZnTe

Твердотільні детектори іонізуючих випромінювань, виконані на основі високоомних напівпровідників, можуть використовуватись в сфері моніторингу безпеки ядерних реакторів. Такі високоомні матеріали, як CdTe і CdZnTe, мають дуже хороші електрофізичні і детекторні властивості. Метою даної роботи було визначення методом комп'ютерного моделювання характеру впливу домішок і структурних дефектів, а також їхніх кластерів на електрофізичні і детекторні властивості $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 0,3$).

Обчислення ґрунтувались на добре апробованих моделях, надійність яких підтвердилась при порівнянні результатів моделювання з відомими експериментальними даними. Встановлено, що глибокі донори з рівнем енергії поблизу середини забороненої зони значно розширюють область високоомного стану CdTe та CdZnTe, яка є придатною для створення детекторів випромінювань. Дослідження також дозволили встановити, що на глибоких рівнях вакансій кадмію має місце захоплення та рекомбінація нерівноважних зарядів завдяки дії домішок Ti, V, Ge, Ni, Sn. З цієї причини такі домішки є шкідливими, вони помітно знижують ефективність збору зарядів детекторів на основі CdTe та CdZnTe. Зменшення електронної рухливості в CdTe і CdZnTe може бути спричинене неоднорідним розподілом домішок (домішковими кластерами). За умови рівномірного розподілу домішок в об'ємі кристалу можна досягти прийнятної детекторної якості високоомного CdZnTe у випадку, коли концентрація шкідливих домішок Ti, V, Ni, Sn, Ge не перевищує вміст «фону». Отримані результати можуть допомогти у визначенні умов отримання матеріалів CdTe та CdZnTe високої детекторної якості.

Ключові слова: CdZnTe, детектори, комп'ютерне моделювання, глибокі рівні, збір зарядів.

INFLUENCE OF IMPURITIES AND STRUCTURAL DEFECTS
ON ELECTROPHYSICAL AND DETECTOR PROPERTIES OF CdTe AND CdZnTe

Solid-state ionizing radiation detectors based on high-resistance semiconductors can be used to monitor the safety of nuclear reactors. High-resistance CdTe and CdZnTe have very good electrophysical and detector properties. The objective of this study was to use computer simulation to determine how impurities and structural defects, as well as their clusters, affect electrophysical and detector properties of $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 0.3$). The calculations were based on well-tested models, the reliability of which was confirmed when comparing simulation results with well-known experimental data. It has been established that deep donors with energy levels near the middle of the band gap considerably extend the area of the high-resistance state of CdTe and CdZnTe, which is suitable for the creation of radiation detectors. The capture and recombination of non-equilibrium charge carriers occurs at the deep levels of cadmium vacancies owing to the influence of Ti, V, Ge, Ni, and Sn impurities. For this reason, such impurities are considered to be harmful, noticeably reducing the efficiency of charge collection η in CdTe and CdZnTe detectors. The decrease of electron mobility in CdTe and CdZnTe can be caused by the distribution heterogeneity of impurities (impurity clusters). When concentration of harmful impurities Ti, V, Ni, Sn, Ge does not exceed the content of the "background", provided that the impurities are distributed over the crystal uniformly, it is possible to obtain high-resistance CdZnTe of an acceptable detector quality. The obtained results could help determining conditions for producing CdTe and CdZnTe materials of high detector quality.

Keywords: CdZnTe, detectors, computer simulation, deep levels, charges collection.

REFERENCES

- Knoll G. F. *Radiation Detection and Measurement*. 4th edition, John Wiley & Sons, Inc., 2010, 829 p.
- Pekarek J., Belas E., Zazvorka J. Long-term stable surface treatments on CdTe and CdZnTe radiation detectors. *Journal of Electronic Materials*, 2017, vol. 46, no. 4, pp. 1996–2002. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-016-5065-5>
- Kim K. H., Hwang S., Fochuk P. et al. The effect of low-temperature annealing on a CdZnTe detector. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2016, vol. 63, no. 4, pp. 2278–2282. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2016.2583546>
- Reihon M., Franc J., Zazvorka J., Dedic V. Influence of low temperature annealing on Schottky barrier height and surface electrical properties of semiinsulating CdTe. *Semiconductor Science and Technology*, 2017, vol. 32, no. 8, pp. 085007–1–6. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6641/aa7500>
- Bell S. J., Baker M. A., Duarte D. D., Schneider A. et al. Performance comparison of small-pixel CdZnTe radiation detectors with gold contacts formed by sputter and electroless deposition. *Journal of Instrumentation*, 2017, vol. 12, pp. 06015–1–10. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/06/P06015>
- Bell S. J., Baker M. A., Duarte D. D. et al. Characterization of the metal semiconductor interface of gold contacts on CdZnTe formed by electroless deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, vol. 48, pp. 275304–275317. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/48/27/275304>
- Sadullaev A. B. [State of impurity atoms with deep layers in semiconductors under strong compensation conditions]. *Molodoi Uchenyi*, 2011, vol. 1, no. 12, pp. 48–50. <https://moluch.ru/archive/35/3956/> (Rus)
- Ruihua Nan, Tao Wang, Gang Xu et al. Compensation processes in high-resistivity CdZnTe crystals doped with In/Al. *Journal of Crystal Growth*, 2016, vol. 451, pp. 150–154. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.07.032>
- Hofmann D. M., Stadler W., Christmann P., Meyer B. K. Defects in CdTe and $Cd_{1-x}Zn_xTe$. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 1996, vol. 380, iss. 1–2, pp. 117–120. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00287-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00287-2)
- Castaldini A., Cavallini A., Fraboni B. et al. Deep energy levels in CdTe and CdZnTe. *J. Appl. Phys*, 1998, vol. 83, iss. 4, pp. 2121–2126.
- Novikov G. F., Radychev N. A. *Russian Chemical Bulletin*, 2007, vol. 56, no. 5, pp. 890–894. <https://doi.org/10.1007/s11172-007-0134-9> (Rus)
- Kolobov G. A., Karpenko A. V. [Refining of light, rare, rare-earth and radioactive metals]. *Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki*, 2016, no. 1, pp. 3–9. (Rus)
- Devyatykh G. G. [Developing high-clean materials]. In collection: *Suchasne Materialoznavstvo XXI Storichchya*. Kiyiv, Naukova dumka, 1998, 658 p. (Ukr)
- Azhazha V. M., Kovtun G. P., Neklyudov I. M. [Complex approach to producing high-clean materials for electronics]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2002, no. 6, pp. 3–6. (Rus)
- Bonch-Bruevich V. L., Kalashnikov S. G. *Fizika poluprovodnikov* [Semiconductor physics]. Moscow, Nauka, 1990, 685 p. (Rus)
- Segall B., Lorenz M. R., Halsted R. E. Electrical properties of n-type CdTe. *Physical Review*, 1963, vol. 129, no. 6, pp. 2471–2481.
- Faulkner R. A. Toward a theory of impurities in semiconductors. *Physical Review*, 1968, vol. 175, no. 3, pp. 991–1009. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.175.991>
- Wolf C. M., Stillman G. E., Lindley W. T. Electron mobility in high-purity GaAs. *Journal of Applied Physics*, 1970, vol. 41, no. 7, pp. 3088. <https://doi.org/10.1063/1.1659368>
- Ruihua Nan, Wanqi Jie et al. Determination of trap levels in CdZnTe:In by thermally stimulated current spectroscopy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2012, vol. 22, pp. 148–152. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61700-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61700-2)
- Zumbiehl A., Fougères P., Hage-Ali M. et al. Resistivity simulation of CdZnTe materials. *Journal of Crystal Growth*, 1999, vol. 197, pp. 670–74.
- Ruihua Nan, Wanqi Jie, Gangqiang Zha et al. Irradiation-induced defects in $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te:Al$. *Journ. Electronic Materials*, 2012, vol. 41, no. 11, pp. 2044–2049. <https://doi.org/10.1007/s11664-012-2204-5>

Описание статьи для цитирования:

Кондрик А. И., Ковтун Г. П. Влияние примесей и структурных дефектов на электрофизические и детекторные свойства CdTe и CdZnTe. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2019, № 5–6, с. 43–50. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.43>

Cite the article as:

Kondrik A. I., Kovtun G. P. Influence of impurities and structural defects on electrophysical and detector properties of CdTe and CdZnTe. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 5–6, pp. 43–50. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.43>

К. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО

Україна, м. Київ, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

УЗГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ІМПУЛЬСІВ З ПРОГРАМОЮ ТИСКУ ЕЛЕКТРОДІВ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ЗВАРЮВАЛЬНОМУ КОНТАКТІ

На основі аналізу електрофізичних процесів, які протікають в зварювальному контакті, та впливу на них параметрів імпульсів зварювального струму з метою їхнього максимального взаємозгодження уточнено закон зміни потужності імпульсу. Для досягнення найкращої якості зварювання надано рекомендації щодо формування фронту та спаду імпульсу залежно від конкретних умов зварювання, параметрів зварюваних деталей та вимог до отримуваних з'єднань. Обґрунтовано доцільність узгодження закону зміни потужності імпульсу з програмою зміни тиску електродів, а також зі зміною опору зони зварювання.

Ключові слова: контактне зварювання, форма імпульсу, зварювальний струм, закон зміни потужності, програма тиску електродів.

Важливою технологічною операцією для багатьох сучасних виробництв, зокрема машинобудування, електронної промисловості, приладобудування, є контактне зварювання, різновид якого, мікрозварювання, застосовується при створенні мікромініатюрних конструкцій, особливо відповідального призначення, як то мікросхеми, електронні компоненти тощо [1–6]. Зварні з'єднання в таких конструкціях, вочевидь, мають характеризуватися підвищеними показниками якості, наприклад відсутністю виплесків застиглого металу, пропалень та непроварів, повторюваністю параметрів зварних точок, що досягається узгодженням параметрів імпульсів зварювального струму з електрофізичними процесами в зварювальному контакті [7–11].

Одним з найпоширеніших способів покращення якості зварних з'єднань є згладжування переднього фронту зварювального імпульсу задля забезпечення плавного введення енергії в зварювальний контакт. При цьому переважно використовується лінійний закон зміни струму $i_{зв}$, іноді — напруги на зварювальних електродах $u_{зв}$ [12–14]. Він забезпечує прийнятні для багатьох застосувань показники якості з'єднань і є простим в реалізації. На **рис. 1** показано приклади зварювальних імпульсів з формуванням фронтів за лінійним законом.

Проте в результаті експериментів було визначено, що кращих показників якості зварних з'єднань можна досягти, якщо формувати не струм або

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (ДБ № 0119U100189).

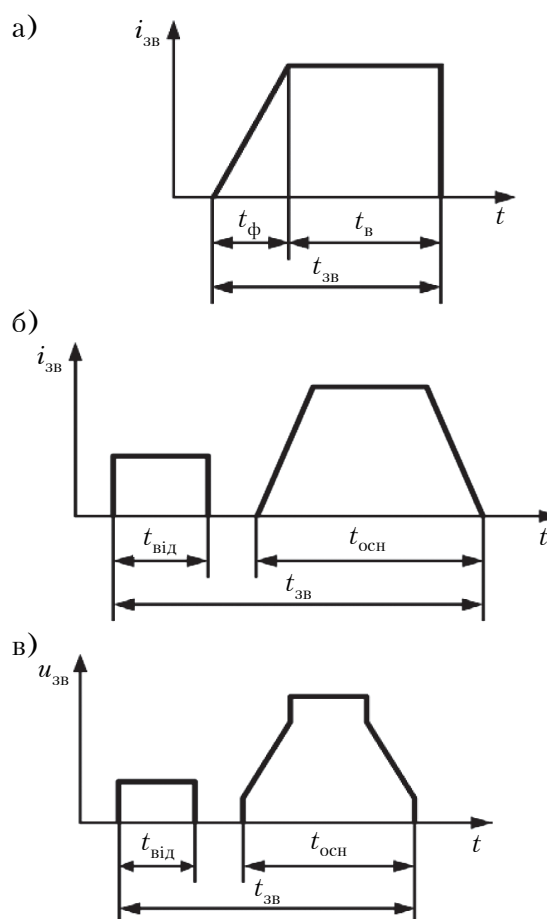


Рис. 1. Приклади використання лінійного закону зміни струму (а, б) та напруги (в) у часі для згладжування фронту зварювального імпульсу:

t_{ϕ} , t_b , $t_{від}$, $t_{осч}$ — тривалість формування фронту, вершини, підігрівального та основного імпульсів відповідно

напругу, а потужність зварювального імпульсу [1–3, 12, 15–21]. Подальші теоретичні та лабораторні дослідження дозволили встановити, що знизити вірогідність виплесків в процесі зварювання можна завдяки реалізації ступеневих законів зміни потужності імпульсу [1, 2, 12–14, 20].

В [2] зазначається, що на початковому етапі процесу зварювання впродовж часу t_ϕ (інтервал від t_0 до t_1 на **рис. 2**), необхідного для стабілізації площі контакту зварюваних деталей, потужність зварювального струму $p_{зв}(t)$ слід збільшувати пропорційно часу з показником ступеню n , після чого підтримувати на постійному максимальному рівні $P_{зв\max}$ до виділення достатньої кількості енергії, оскільки площа зварювального контакту в подальшому залишається практично незмінною (інтервал від t_1 до t_2). Такий закон зміни потужності зварювального струму описується формулою

$$p_{зв}(t) = \begin{cases} P_{зв\max} \cdot \left(\frac{t}{t_\phi}\right)^n, & t_0 \leq t \leq t_1; \\ P_{зв\max}, & t_1 \leq t \leq t_2. \end{cases} \quad (1)$$

Показник ступеню n закону зміни потужності $p_{зв}(t)$ визначається електричним опором та твердістю матеріалів зварюваних деталей, їхньою схильністю до окиснення, товщиною та конфігурацією деталей, станом їхніх поверхонь, зусиллям стиснення електродів, і тому зрозуміло, що для різних умов зварювання оптимальне значення n має бути різним. Також відомо, що в деяких випадках оптимальний режим зварювання може бути досягнутий за дробового значення n [2].

В [2] також вказано, що теоретичне обчислення показника ступеню n є дуже складним, оскільки він залежить від надто багатьох пара-

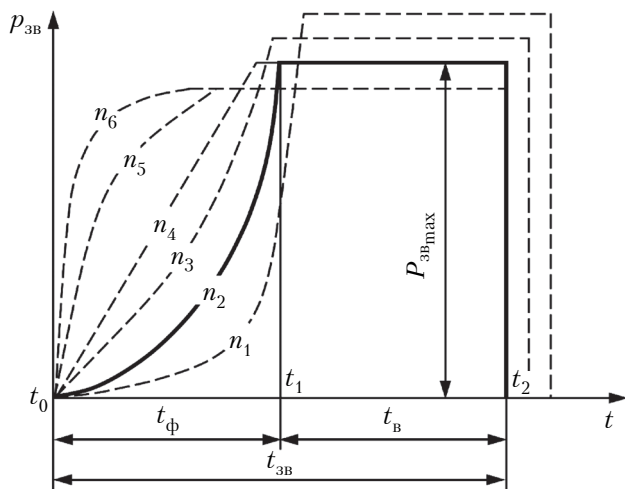


Рис. 2. Приклади форми імпульсів, в яких на етапі формування фронту потужність змінюється пропорційно часу з показником ступеню n_i

метрів, а кількісні значення деяких з них найчастіше взагалі неможливо встановити напевне, і тому пропонується визначати цей показник емпіричним шляхом на підготовчому етапі зварювання, проводячи серії експериментів. Звичайно, такий підхід складно назвати зручним, оскільки, якщо змінюються умови зварювання, технолог кожного разу має практично «наосліп» перебирати всі можливі варіанти значень показника n .

Отже очевидно, що закон зміни потужності потребує подальших досліджень для встановлення відповідності між фактичними умовами зварювання та необхідним показником ступеню на етапі формування фронту, а також для врахування електрофізичних процесів, які протікають у зварювальному контакті на заключному етапі, коли відбувається охолодження зварного з'єднання.

Метою даної роботи є узгодження закону зміни потужності зварювальних імпульсів з електрофізичними процесами у зварювальному контакті задля досягнення найкращої якості зварюваних з'єднань, а також внесення якомога більшої визначеності в процес попереднього підбору параметрів зварювального імпульсу.

Уточнення закону зміни потужності зварювальних імпульсів відповідно до умов зварювання

Виходячи з наявних даних, спочатку спробуємо встановити рекомендовані діапазони значень показника ступеню n , які можуть бути застосовані для певних умов зварювання.

Відомо [20], що для попередження виплесків металу в процесі контактного зварювання необхідно забезпечувати сталість інтенсивності тепловиділення, що припадає на одиницю площі фактичного контакту $s_k(t)$ поверхонь зварюваних деталей. Оскільки інтенсивність тепловиділення $q(t)$ є пропорційною потужності зварювального струму, цю умову можна записати наступним чином:

$$\frac{q(t)}{s_k(t)} = \frac{k \cdot p_{зв}(t)}{s_k(t)} = \text{const}, \quad (2)$$

де k — коефіцієнт пропорційності.

З урахуванням того, що на початковому етапі площа фактичного контакту зварюваних деталей в результаті пробою поверхневих оксидних плівок та зминання мікронерівностей поступово збільшується (**рис. 3**), для підтримання виконання співвідношення (2) потужність зварювального струму також має поступово наростати. З рівняння (2) видно, що чим повільніше збільшується площа фактичного контакту, тим повільніше потрібно нарощувати кількість теплової енергії, що вводиться в контакт.



Рис. 3. Змінання мікронерівностей поверхонь зварюваних деталей

Виходячи зі сказаного, для попередження ви- плесків на початковому етапі зварювання мож- на запропонувати дотримуватись наступних за- гальних рекомендацій.

Коли деталі мають високу шорсткість по- верхні та/або високу твердість матеріалу, та/ або матеріал деталей є легко окислюваним, а та- кож коли неможливо досягти значного зусилля стиснення зварювальних електродів, зміна пло- щі справжнього контакту на етапі зварювання відбувається повільно, тому у таких випадках необхідно забезпечувати плавне наростання по- тужності зварювального імпульсу, тобто показ- ник ступеню n в формулі (1) доцільно встанов- лювати більшим за одиницю.

Якщо ж, навпаки, якість обробки поверхонь зварюваних деталей є високою і, відповідно, шорсткість є незначною, матеріал деталей є до- статньо м'яким та/або слабо окислюваним, та/ або зусилля початкового стиснення електродів є значним, прийнятним буде більш швидке вве- дення теплової енергії в зварювальний контакт, і показник ступеню n допустимо встановлювати меншим за одиницю.

Якщо конфігурація зварюваних деталей є та- кою, що передбачає малу площу контактування (наприклад, зварювання прутків круглого пе- ретину навхрест), потрібно здійснювати введен- ня енергії в контакт більш плавно, ніж у випад- ках, коли площа контактування є доволі вели- кою (наприклад, зварювання пластин).

Наведені рекомендації для зручності зведе- ні у **таблицю**.

Наступний етап — формування зварюваль- ного імпульсу (інтервал від t_1 до t_2 на рис. 2). З урахуванням майже незмінного характеру опо- ру зони зварювання під час формування звар- ного ядра [20, 22] умова (2) також підтверджує необхідність підтримувати потужність зварю-

вального імпульсу на постійному рівні до виді- лення в контакт потрібної для зварювання кіль- кості енергії.

Заключному етапу зварювання зазвичай при- діляють менше уваги, ніж початковому, тому піс- ля завершення інтервалу, на якому підтриму- ється постійний рівень потужності, зварюваль- ний струм здебільшого просто вимикають [12, 18–20]. Проте відомі приклади, коли спад зварювального імпульсу також формують [11, 12, 23]. Завдяки сучасному електронно-оптичному обладнанню нещодавно з'явилась можливість отримати дані, які свідчать про дуже важли- ву роль заключного етапу утворення зварного з'єднання з точки зору його міцності [24, 25]. Аналіз мікрошліфів зварних з'єднань пока- зав наявність безпосередньої залежності якості з'єднання від режиму охолодження зони зварю- вання. Правильно підібраний режим охолоджен- ня на заключному етапі зварювання сприяє фор- муванню рівномірної мікроструктури ядра, зда- тен запобігти утворенню механічних напруг та усадкових порожнин. Оптимальний режим охо- лодження визначається матеріалами зварюваних деталей та програмою зміни тиску зварюваль- них електродів. У зв'язку з цим, доцільно ви- користовувати емпіричний підбір оптимального закону зміни потужності зварювального імпуль- су на етапі його спаду для кожного окремого ви- падку, подібно до того, як це було запропоно- вано для етапу формування фронту. При цьому можна дотримуватись наступних рекомендацій.

В тих випадках коли необхідно надати звар- ним з'єднанням пружних властивостей (на- приклад, при виробництві електромеханічних фільтрів), охолоджувати контакт слід якомога швидше, для чого, відповідно, після завершен- ня формування зварного ядра (пласка ділянка імпульсу) необхідно різко знизити зварюваль- ний струм. Якщо ж пріоритетом є однорідність структури з'єднання та відсутність залишко- вої напруги, охолодження слід здійснювати по- вільно, формуючи плавний спад зварювально- го імпульсу, дію якого можна порівняти з про- цесом відпаду.

Рекомендації щодо вибору показника ступеню n закону зміни потужності зварювального імпульсу на етапі формування фронту

Характеристика фактору впливу на процес зварювання					Рекомендоване значення n
Шорсткість по- верхні деталей	Твердість мате- ріалу деталей	Схильність матеріа- лу до окиснення	Площа контакту деталей	Зусилля стиснення електродів	
значна	висока	висока	мала	незначне	$n \geq 1$
мала	низька	низька	велика	значне	$n \leq 1$

Таким чином, пропонується формувати зварювальний імпульс так, як показано на **рис. 4**, згідно з формулою

$$p_{зв}(t) = \begin{cases} P_{зв\max} \cdot \left(\frac{t}{t_\phi}\right)^n, & t_0 \leq t \leq t_1; \\ P_{зв\max}, & t_1 \leq t \leq t_2; \\ P_{зв\max} \cdot \left(\frac{t_{имп} - t}{t_{сп}}\right)^m, & t_2 \leq t \leq t_3. \end{cases} \quad (3)$$

де m — показник ступеню закону зміни потужності зварювального імпульсу на етапі спаду тривалістю $t_{сп}$ (інтервал від t_2 до t_3 на **рис. 4**);

$t_{имп}$ — загальна тривалість зварювального імпульсу.

Форма зварювальних імпульсів, наведених на **рис. 4**, враховує особливості електрофізичних процесів в зварювальному контакті і є максимально узгодженою з ними. Так, плавний фронт імпульсу з підбором значення показника ступеню n закону зміни потужності забезпечує на початковому етапі поступове введення належної кількості енергії для зварювання впродовж найбільш нестабільної фази формування первинного контакту. Плоска вершина зварювального імпульсу забезпечує підтримування постійного енерговиділення в контакті на достатньо стабільному, з точки зору величини контактної опору, етапі формування зварного ядра. Плавний спад імпульсу з підбором показника ступеню m забезпечує таке охолодження місця зварювання, яке гарантує міцність та однорідність структури з'єднання.

Очевидно, що тривалість основних ділянок зварювального імпульсу, фронту, вершини та

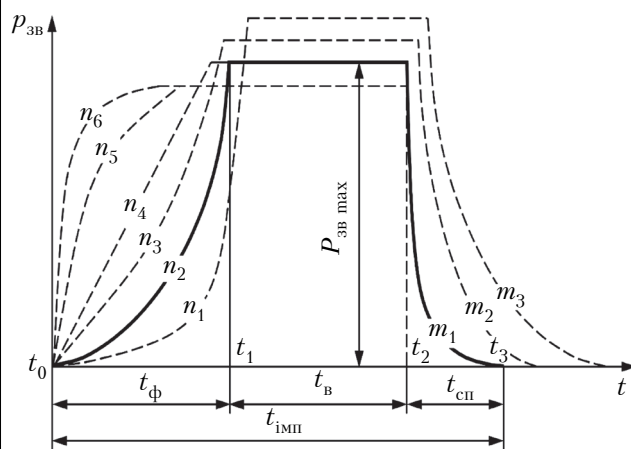


Рис. 4. Приклади форми імпульсів, в яких на етапах формування фронту та спаду потужність змінюється пропорційно часу з показником ступеню n_i та m_i відповідно

спаду має бути узгоджена з технологічними умовами зварювання. Як було зазначено раніше, одним з найважливіших факторів впливу на протікання та результат процесу контактного зварювання є тиск зварювальних електродів, і для покращення якості зварних з'єднань застосовують спеціальні програми його зміни в процесі зварювання [1, 26–30]. Розглянемо можливість узгодження параметрів зварювальних імпульсів з програмою зміни тиску зварювальних електродів.

Узгодження параметрів зварювальних імпульсів з програмою зміни тиску зварювальних електродів

На первинній стадії зварювання тиск електродів має бути значним, щоб забезпечити якнайшвидше руйнування оксидних плівок та мікронерівностей на поверхнях зварюваних деталей і тим самим стабілізувати контактний опір. Далі, з моменту початку формування зварного ядра тиск слід суттєво зменшити (навіть до нуля), бо надмірний тиск в зоні зварювання за наявності рідкої фази металу може призвести до утворення дефектів. На завершальній стадії тиск знову необхідно збільшити для проковування місця зварювання, що підвищить міцність з'єднання.

Графіки зміни сили стиснення $f_{ст}$ зварювальних електродів згідно з описаною програмою представлено на **рис. 5** для двох випадків.

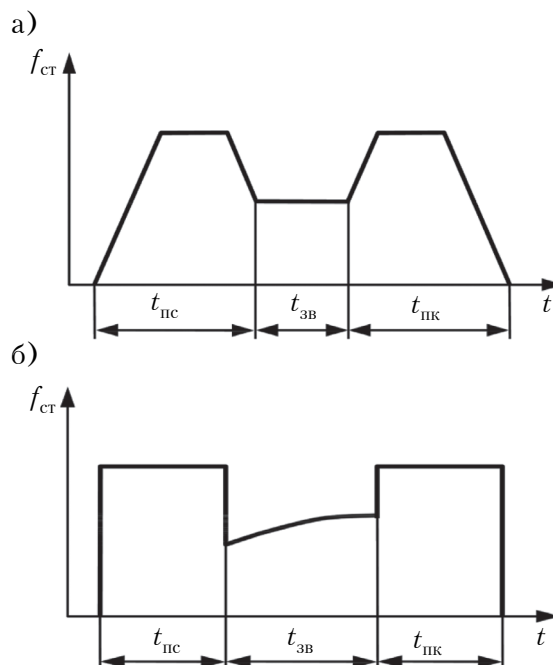


Рис. 5. Варіанти (а, б) зміни сили стиснення зварювальних електродів згідно з заданою програмою: $t_{пс}$ — тривалість попереднього стиснення електродів; $t_{зв}$ — тривалість основного етапу зварювання (формування ядра); $t_{пк}$ — тривалість кінцевої обробки (проковування)

В першому (рис. 5, а) використовується поступове збільшення та зменшення тиску, відповідно, на початку та в кінці зварювання, а також під час переходу від однієї стадії до іншої впродовж зварювального циклу. В другому випадку (рис. 5, б) на початковій та завершальній стадіях до зварювального контакту прикладається максимальний стабільний тиск, а на стадії формування ядра — попередньо зменшений до мінімуму тиск плавно нарощується до моменту початку проковування.

При цьому треба мати на увазі, що у застосовуваних програмах зміни тиску зварювальних електродів не передбачено відстеження величини сили стиснення в процесі зварювання, а отже, і її автоматичне регулювання залежно від поведінки навантаження. Принаймні, відомості щодо цього у відкритих джерелах не зустрічаються.

Відсутність спеціальних законів формування зміни тиску зварювальних електродів з його автоматичним регулюванням безумовно є недоліком існуючих систем. Це можна пояснити труднощами, пов'язаними з тим, що тривалість контактної мікрозварювання дуже мала (може складати одиниці мілісекунд), тоді як механічна система досить інерційна і зазвичай не може забезпечити ефективне використання зворотних зв'язків контурів регулювання для точного відпрацювання заданої програми в межах даного часу [27, 31, 32].

У програмі зміни тиску зварювальних електродів найчастіше застосовуються прості закони зміни параметрів імпульсів зварювального стру-

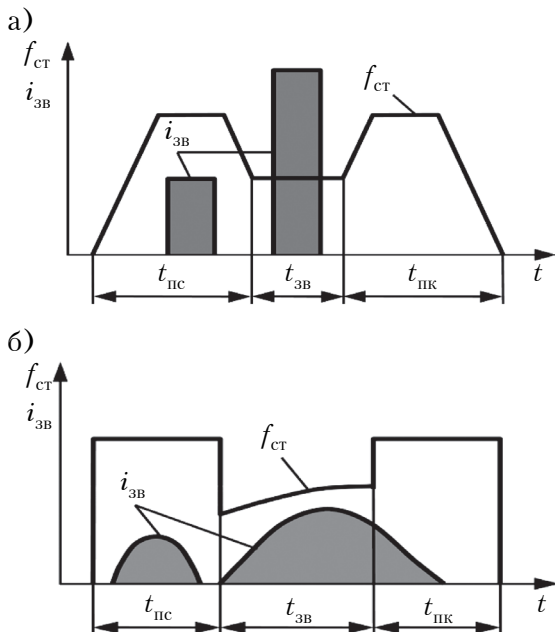


Рис. 6. Варіанти (а, б) зміни сили стиснення зварювальних електродів згідно з заданою програмою, суміщені з імпульсами зварювального струму

му, форма яких в цих випадках є прямокутною або визначається розрядом ємнісного накопичувача. На рис. 6 представлено суміщення наведених на рис. 5 графіків зміни тиску електродів з імпульсами зварювального струму $i_{зв}(t)$. При цьому в наведених прикладах форма імпульсів є нерегульованою, хоча й в них застосовані імпульси попереднього підігріву. Очевидно, що найбільш ефективним буде випадок максимального узгодження параметрів імпульсів зварювального струму з програмою зміни тиску електродів $f_{ст}(t)$, тобто коли у характерних інтервалах формування електричних імпульсів їхні параметри знаходяться у повній відповідності до основних стадій програми $f_{ст}(t)$.

На рис. 7 наведено приклад взаємоузгоджених змін потужності зварювального імпульсу $p_{зв}(t)$, тиску зварювальних електродів $f_{ст}(t)$ та опору зони зварювання $r_{зз}(t)$, який відображає зміни електрофізичних процесів в зварювальному контакті. Так, спочатку, з метою активації поверхонь деталей через часткове руйнування оксидних плівок та зминання мікронерівностей, впродовж інтервалу попереднього стиснення $t_{пс}$ здійснюється максимальний тиск на деталі у

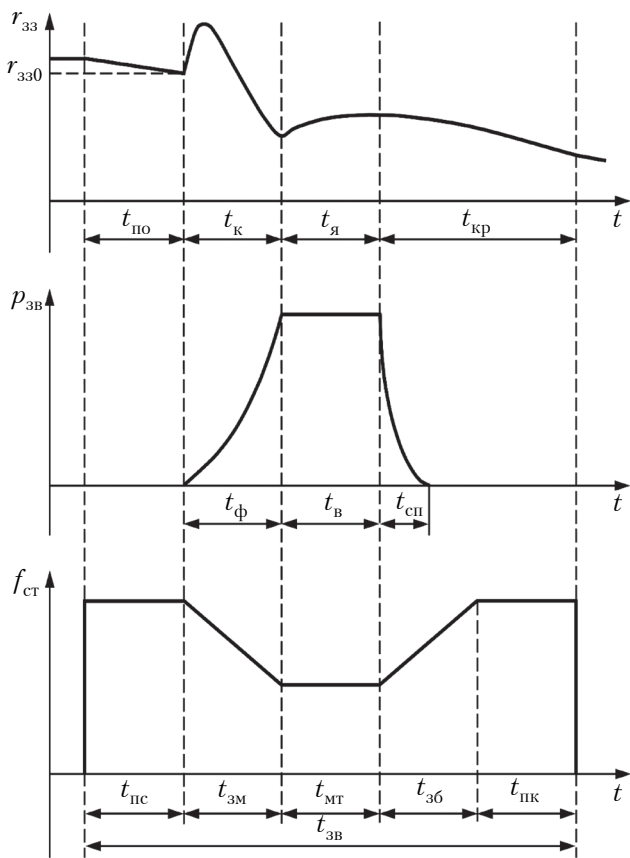


Рис. 7. Зміни опору у зоні зварювання $r_{зз}(t)$, потужності зварювального імпульсу $p_{зв}(t)$ та сили стиснення електродів $f_{ст}(t)$, узгоджені між собою

відсутності зварювального струму. При цьому опір зони зварювання r_{33} дещо зменшується через збільшення площі справжнього контакту поверхонь зварюваних деталей і в кінці інтервалу $t_{по}$ досягає значення r_{330} , яке є початковим для процесу зварювання.

Далі, впродовж інтервалу $t_{3м}$ здійснюється поступове зменшення сили стиснення електродів до певного мінімального рівня і одночасне плавне формування фронту ($t_{ф}$) зварювального імпульсу $p_{3в}$. Інтервал зменшення тиску $t_{3м}$ відповідає інтервалу формування первинного контакту $t_{к}$, впродовж якого відбуваються найбільші зміни опору зони зварювання. Отже, $t_{3м} = t_{ф} = t_{к}$.

Наступний інтервал $t_{мт}$, впродовж якого підтримується постійне мінімальне значення тиску зварювальних електродів, узгоджено в часі з протяжністю (тривалістю) вершини зварювального імпульсу $t_{в}$. Цей інтервал відповідає фазі поступової стабілізації опору зони зварювання, що свідчить про формування зварного ядра ($t_{я}$). Тобто, $t_{мт} = t_{в} = t_{я}$.

Після цього впродовж інтервалу $t_{3б}$ здійснюється плавне збільшення тиску до максимального рівня, яке може повністю або частково співпадати в часі зі спадом зварювального струму ($t_{сп}$). В цей період відбувається поступове охолодження зварювального контакту та кристалізація металу ядра ($t_{кр}$), що супроводжується повільним зменшенням опору зони зварювання.

Заключним є інтервал проковування $t_{пк}$, коли у відсутності зварювального струму підтримується постійний максимальний тиск і продовжуються процеси охолодження та кристалізації.

Відтак, тривалість повного циклу зварювання $t_{3в}$ фактично дорівнює сумі часових інтервалів, що визначають тривалість програми зміни тиску зварювальних електродів:

$$t_{3в} = t_{пс} + t_{3м} + t_{мт} + t_{3б} + t_{пк}. \quad (4)$$

Математично програма зміни тиску електродів описується так:

$$f_{ст}(t) = \begin{cases} F_{ст\max}, & t \in t_{пс}; \\ F_{ст\max} - k_1 \cdot (t - t_{пс}), & t \in t_{3м}; \\ F_{ст\min}, & t \in t_{мт}; \\ F_{ст\min} + k_2 \cdot (t - t_{пс} - t_{3м} - t_{мт}), & t \in t_{3б}; \\ F_{ст\max}, & t \in t_{пк}, \end{cases} \quad (5)$$

де k_1, k_2 — кутові коефіцієнти відрізків прямих на інтервалах $t_{3м}$ і $t_{3б}$ відповідно;

$F_{ст\max}, F_{ст\min}$ — максимальна та мінімальна величини стиснення електродів відповідно.

Слід звернути увагу на те, що на рис. 7 інтервали $t_{пс}$ і $t_{пк}$ показано однаковими, проте це не є

жорстко визначеним, і їхня тривалість може варіюватись. Збільшення кожного з цих інтервалів сприятиме покращенню якості зварних з'єднань. Мінімальними вимогами до їхньої тривалості є, відповідно, забезпечення прийняттого первинного значення опору r_{330} і досягнення достатньої міцності з'єднання під час проковування.

Також на рис. 7 показані однаковими й інтервали $t_{3м}$ і $t_{3б}$, і це також не є обов'язковою умовою. Вимога полягає в тому, щоб збільшення тиску на інтервалі $t_{3б}$ не здійснювалося різко, інакше це може спричинити продавлення місця формування з'єднання через присутність рідкої фази металу.

Закони поступової зміни тиску зварювальних електродів на інтервалах $t_{3м}$ і $t_{3б}$ показано лінійними, оскільки відтворення інших законів в характерних для мікрозварювання часових межах є доволі складним через інерційність механічної системи переміщення електродів.

Таким чином, для отримання якісного зварного з'єднання критично важливим є узгодженість між собою інтервалів наростання потужності зварювального струму, зменшення тиску електродів та формування первинного контакту, а також забезпечення співпадіння в часі інтервалу підтримування максимального значення потужності з інтервалом мінімального тиску електродів впродовж утворення зварного ядра.

Висновки

Проведене в роботі уточнення закону зміни потужності зварювального імпульсу дозволяє більш точно врахувати особливості електрофізичних процесів в зварювальному контакті. Так, плавний фронт імпульсу, отриманий згідно зі ступеневим законом зміни потужності з підбором значення показника ступеню n , забезпечує поступове введення необхідної кількості енергії для зварювання впродовж найбільш нестійкої, з точки зору величини контактного опору, фази формування первинного контакту. Завдяки плоскій вершині зварювального імпульсу підтримується постійне енерговиділення в контакті впродовж достатньо стабільної фази формування зварного ядра. І нарешті, плавний спад імпульсу, отриманий з підбором показника ступеню m закону зміни потужності, забезпечує належне охолодження місця зварювання, що гарантує міцність та однорідність структури з'єднання. Завдяки наданим рекомендаціям щодо формування фронту та спаду зварювального імпульсу залежно від конкретних умов зварювання, параметрів зварюваних деталей та вимог до зварюваних з'єднань можна досягти найкращої якості зварювання.

Запропонований варіант узгодження між собою змін потужності зварювального імпульсу, тиску зварювальних електродів та електрофізичних процесів в зварювальному контакті (опору зони зварювання) є обґрунтованим з точки зору впливу тиску електродів на зварювальний процес.

Узгодження формування імпульсів зварювального струму з електрофізичними процесами в контакті та з програмою тиску зварювальних електродів здатне забезпечити максимально високу якість зварних з'єднань і, відповідно, високу якість кінцевої продукції, виготовлення якої потребує використання зварювальних операцій.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Атауш В. Е., Леонов В. П., Москвин Э. Г. Микросварка в приборостроении. — Рига: РТУ, 1996.
2. Бондаренко А. Ф. Формирователи импульсов тока для установок контактной микросварки / Дис. ... канд. техн. наук, спец. 15.09.12. — Алчевск: ДонГТУ, 2007. — 211 с.
3. Salem M. Control and Power Supply for Resistance Spot Welding (RSW) / Electronic Thesis and Dissertation Repository, 130. — 2011. — <https://ir.lib.uwo.ca/etd/130>
4. Masomtob M., Sukondhasingha R., Becker J., Sauer D. U. Parametric study of spot welding between li-ion battery cells and sheet metal connectors // Engineering Journal. — 2017. — Vol. 21, iss. 7. — P. 457–473. — <https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.7.457>
5. Matsuyama K. Application of various micro-welding processes — characteristics and recent trends // Welding International. — 2008. — Vol. 22, iss. 4. — P. 225–233. — <https://doi.org/10.1080/09507110802117602>
6. Zhou Y., Hu A. From microjoining to nanojoining // The Open Surface Science Journal. — 2010. — Vol. 3, N 1. — P. 32–41. <https://doi.org/10.2174/1876531901103010032>
7. Гнусов С. Ф., Киселев А. С., Слободян М. С. и др. Формирование соединения при точечной микросварке // Сварочное производство. — 2005. — № 4. — С. 37–41.
8. Gnyusov S. F., Kiselev A. S., Slobodyan M. S. et al. Formation of a joint in resistance spot microwelding // Welding International. — 2005. — Vol. 19, N 9. — P. 737–741. — <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3510>
9. Гнусов С. Ф., Киселев А. С., Слободян М. С. и др. Влияние параметров режима точечной микросварки на структуру и свойства соединений из сплава Э110 // Известия Томского политехнического университета. — 2005. — Vol. 308, N 3. — P. 135–139. — <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/688>
10. Гнусов С. Ф., Киселев А. С., Слободян М. С., Советченко Б. Ф. Стабилизация контактных сопротивлений при точечной микросварке // Известия Томского политехнического университета. — 2006. — Vol. 309, N 1. — P. 130–133. — <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/1009>
11. Slobodyan M. S., Kiselev A. S. Optimization of welding parameters for small-scale resistance spot welding of zirconium alloys // Materials Science Forum. — 2019. — Vol. 970. — P. 145–152. — <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.970.145>
12. Fundamentals of Small Parts Resistance Welding / Amada Miyachi Inc., 2019. — http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Feducationalresources_fundamentals&file=01530000000Jybm
13. Steinmeier D. W. 'Downsizing' in the World of Resistance Welding // Welding Journal. — 1998. — Vol. 77, N 7. — P. 39–47. — https://www.microjoining.com/articles/Downsizing_Resistance_Welding.pdf
14. Steinmeier D. Resistance welding-power supply feedback mode selection / microJoining Solutions-microTipsTM, 2010. — http://www.microjoining.com/docs/1352551459_microtip_resistance_power_supply_feedback_modes.pdf
15. Brown L. J., Lin J. Power supply designed for small-scale resistance spot welding // Welding Journal. — 2005. — Vol. 84, N 7. — P. 32–36. — https://app.aws.org/wj/2005/07/WJ_2005_07.pdf
16. Ланкин Ю. Н. Автоматическое регулирование режима точечной сварки по электрическим параметрам // Автоматическая сварка. — 1963. — Т. 16, № 5 (122). — С. 16–19.
17. Атауш В. Е., Леонов В. П. Разработка управляемых источников питания для контактной микросварки // Metinā ana un radnieciskas tehnoloģijas: starptautiskais seminārs. — Латвия, Рига. — 1996. — С. 81–85.
18. Атауш В., Квасневский Д. Исследование процесса точечной контактной микросварки крестообразных соединений никелевых проволок с авторегулированием процесса по падению напряжения между электродами и сварочному току // Metināšana. Tehnoloģija, iekārtas, materiāli, radnieciskās tehnoloģijas: III starptautiskā konference. — Латвия, Рига. — 1999. — С. 162–167.
19. Леонов В. П., Атауш В. Е. Малоинерционный источник питания для микросварки и пайки с обратной связью по электроэнергетическим параметрам // В кн. «Припой для пайки современных материалов» / Под ред. А. А. Россошинского. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1985. — С. 133–139.
20. А. с. 1214368 СССР. Устройство для управления процессом контактной точечной сварки / В. П. Леонов, В. Е. Атауш, Э. В. Бумбиерис, М. А. Калейс. — 1986. — Бюл. № 8.
21. Yu J. New methods of resistance spot welding using reference waveforms of welding power // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. — 2016. — Vol. 17, N 10. — С. 1313–1321. — <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0156-z>
22. Mikno. Z., Stepien M., Grzesik B. Optimization of resistance welding by using electric servo actuator // Welding in the World. — 2017. — Vol. 61, N 3. — P. 453–462. — <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0437-x>
23. Shin S., Park D.-J., Yu J., Rhee S. Resistance spot welding of aluminum alloy and carbon steel with spooling process tapes // Metals. — 2019. — Vol. 9, N 4. — С. 410. — <https://doi.org/10.3390/met9040410>
24. Patent US20130020288A1 2013. System and method of welding a workpiece / Moision W. C., Hetrick E. T. — <https://patents.google.com/patent/US20130020288A1/en>
25. Steinmeier D. Upslope and downslope use in resistance welding / microJoining Solutions-microTipsTM, 2017. — http://www.microjoining.com/docs/1483822194_microtip_resistance_up-downslope.pdf
26. Моравский В. Э., Ворона Д. С. Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки. — Киев: Наукова думка, 1985.
27. Письменный А. С., Пентегов И. В., Кислицын В. М. и др. Устройства для ударной обработки сварного шва в процессе точечной контактной сварки // Автоматическая сварка. — 2011. — Т. 693, № 1. — С. 52–55. — <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/102306>
28. Bondarenko O. F., Bondarenko Iu. V., Safronov P. S., Sydorets V. M. Current and force control in micro resistance welding machines Review and development // 2013 8th International Conference on "Compatibility and Power

Electronics (CPE)". — 2013. — P. 298–303. — <https://doi.org/10.1109/CPE.2013.6601173>

29. Tang H., Hou W., Hu S. J. Forging force in resistance spot welding // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. — 2002. — Vol. 216, N 7. — P. 957–968. — <https://doi.org/10.1243/09544050260174166>

30. Charde N. Forging force in resistance spot welding: analyzing the electrically generated forging force for two different electrode actuations // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2017. — Vol. 90, iss. 1–4. — P. 211–218. — <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9352-3>

31. Бондаренко А. Ф., Сидорец В. Н., Бондаренко Ю. В. Совершенствование источников питания для контактной микросварки // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. — 2012. — № 28. — С. 60–63.

32. Linear DC Weld Control UB29/UB29A/DC29 Operation Manual / Amada Miyachi Inc., 2013. — <http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?requestURL=%2Fapex%2Fproduct%3Fcategoryid%3Dresistance-welding%26groupid%3Drw-power-supplies%26productid%3Ddc29&file=01580000001bZNjAAM>

Дата надходження рукопису
до редакції 15.11 2019 г.

DOI: 10.15222/TKEA2019.5-6.51

УДК 621.791.76/.79: 621.791.03

А. Ф. БОНДАРЕНКО

Украина, г. Киев, КПИ им. Игоря Сикорского

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

СОГЛАСОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВАРОЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ПРОГРАММОЙ ДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В СВАРОЧНОМ КОНТАКТЕ

На основе анализа электрофизических процессов, протекающих в сварочном контакте, и влияния на них параметров сварочных импульсов с целью их максимального взаимного согласования уточнен закон изменения мощности импульса. Для достижения наилучшего качества сварки даны рекомендации по формированию фронта и спада импульса в зависимости от конкретных условий сварки, параметров свариваемых деталей и требований к получаемым соединениям. Обоснована целесообразность согласования закона изменения мощности импульса с программой изменения давления электродов, а также с изменением сопротивления зоны сварки.

Ключевые слова: контактная сварка, форма импульса, сварочный ток, закон изменения мощности, программа давления электродов.

DOI: 10.15222/TKEA2019.5-6.51

UDC 621.791.76/.79: 621.791.03

О. Ф. BONDARENKO

Ukraine, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

COORDINATION OF WELDING PULSE PARAMETERS WITH ELECTRODE PRESSURE PROGRAM AND ELECTROPHYSICAL PROCESSES IN WELDING CONTACT

Resistance welding is an important technological operation for many modern industries, including mechanical engineering, electronics and instrument making. Micro resistance welding is used in producing of microstructures for critical purposes, such as electronic components, circuits, etc. It is obvious that welded joints in such structures should be characterized by such high quality indicators as the absence of solid metal splashes, burnouts, faulty fusions, and the repetitiveness of dimensions of welding spots, which are achieved by coordinating the parameters of welding current pulses with electrophysical processes in welding contact.

Thus, in this paper, the authors analyze electrophysical processes taking place in the welding contact and the effect of the welding current pulse parameters on these processes, in order to mutually coordinate them. This allows specifying the law of pulse power change, which makes it possible to take into account the features of electrophysical processes in the welding contact to the full extent. The smooth rise of the pulse power, obtained according to the exponent law with selection of the optimal exponent n value, provides gradual input of energy required for welding during the most unstable phase of primary contact formation.

Due to the flat top of the welding pulse, the constant energy input to the contact is maintained during a rather stable phase of welding core formation. Finally, the smooth pulse fall obtained by selecting the optimal exponent m value of the power change law provides the proper cooling of the welding spot, which guarantees the strength and uniformity of the joint structure. To achieve the best welding quality, the recommendations

are given regarding the formation of rise and fall of the pulse, depending on specific welding conditions, parameters of the welded parts and requirements for the obtained joints.

The paper shows that it is a useful practice to coordinate the pulse power change law with the program of changing the pressure of the electrodes, and with changing the resistance of the welding zone. The proposed example of coordination between welding pulse power change, welding electrode pressure and electrophysical processes in the welding contact (resistance of the welding zone) is substantiated in terms of the influence of the electrode pressure on the welding process. This practice can provide the highest quality of welded joints and thus the highest quality of the end products manufactured by welding.

Keywords: resistance welding, pulse shape, welding current, power change law, electrode pressure program.

REFERENCES

1. Ataush V. Ye., Leonov V. P., Moskvina E. G. *Mikrosvarka v priborostroyeni* [Micro welding in instrument making]. Riga, RTU, 1996. (Rus)
2. Bondarenko O. F. *Formirovani impulsov toka dlya ustanovok kontaktной mikrosvarki* [Current pulses generators for micro resistance welding machines]. Thesis in the specialty 15.09.12, Alchevsk, DonSTU, 2007, 211 p. (Rus)
3. Salem M. *Control and Power Supply for Resistance Spot Welding* (RSW). Electronic Thesis and Dissertation Repository, 130, 2011. <https://ir.lib.uwo.ca/etd/130>
4. Masomtob M., Sukondhasingha R., Becker J., Sauer D.U. Parametric study of spot welding between li-ion battery cells and sheet metal connectors. *Engineering Journal*, 2017, vol. 21, iss. 7, pp. 457–473. <https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.7.457>
5. Matsuyama K. Application of various micro-welding processes — characteristics and recent trends. *Welding International*, 2008, vol. 22, iss. 4, pp. 225–233. <https://doi.org/10.1080/09507110802117602>
6. Zhou Y., Hu A. From microjoining to nanojoining. *The Open Surface Science Journal*, 2010, vol. 3, no. 1, pp. 32–41. <https://doi.org/10.2174/1876531901103010032>
7. Gnyusov S. F., Kiselev A. S., Slobodyan M. S. et al. [Formation of a joint in resistance spot microwelding]. *Svarochnoe Proizvodstvo*, 2005, no. 4, pp. 37–41. (Rus)
8. Gnyusov S. F., Kiselev A. S., Slobodyan M. S. et al. Formation of a joint in resistance spot microwelding. *Welding International*, 2005, vol. 19, no. 9, pp. 737–741. <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3510>
9. Gnyusov S. F., Kiselev A. S., Slobodyan M. S. et al. [Effect of spot micro-welding mode parameters on the structure and properties of compounds of alloy Э110]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 3, pp. 135–139. <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/688> (Rus)
10. Gnyusov S. F., Kiselev A. S., Slobodyan M. S., Sovetchenko B. F. [Stabilization of contact resistances during spot welding]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 1, pp. 130–133. <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/1009> (Rus)
11. Slobodyan M. S., Kiselev A. S. Optimization of welding parameters for small-scale resistance spot welding of zirconium alloys. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 970, pp. 145–152. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.970.145>
12. Amada Miyachi Inc. *Fundamentals of Small Parts Resistance Welding*, 2019. http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Feducationalresources_fundamentals&file=01530000000Jybm
13. Steinmeier D. W. ‘Downsizing’ in the World of Resistance Welding, *Welding Journal*, 1998, vol. 77, no. 7, pp. 39–47. https://www.microjoining.com/articles/Downsizing_Resistance_Welding.pdf
14. Steinmeier D. Resistance Welding-Power Supply Feedback Mode Selection. *microJoining Solutions-microTipsTM*, 2010. http://www.microjoining.com/docs/1352551459_microtip_resistance_power_supply_feedback_modes.pdf
15. Brown L. J., Lin J. Power supply designed for small-scale resistance spot welding. *Welding Journal*, 2005, vol. 84, no. 7, pp. 32–36. https://app.aws.org/wj/2005/07/WJ_2005_07.pdf
16. Lankin Yu. N. [Automatic control of the spot welding mode by electrical parameters]. *Avtomaticheskaya Svarka*, 1963, vol. 16, no. 5 (122), pp. 16–19. (Rus)
17. Ataush V. Ye., Leonov V. P. [Development of controlled power supplies for contact welding]. *Metināšana un radnieciskās tehnoloģijas: starptautiskais seminārs*, Riga, Latvija, 1996, pp. 81–85. (Rus)
18. Ataush V. Ye., Kvasnevskii D. [Investigation of the process of spot contact microwelding of cruciform joints of nickel wires with auto-regulation of the process according to the voltage drop between the electrodes and the welding current]. *Metināšana. Tehnoloģija, iekārtas, materiāli, radnieciskās tehnoloģijas: III starptautiskā konference*, Riga, Latvija, 1999, pp. 162–167. (Rus)
19. Leonov V. P., Ataush V. Ye. [Investigation of the process of spot contact microwelding of cruciform joints of nickel wires with auto-regulation of the process according to the voltage drop between the electrodes and the welding current]. In the book “*Pripoi dlya payki sovremennykh materialov*” [Solders for soldering modern materials], ed. by A. A. Rossoshinskiy, Kyiv, E. O. Paton Electric Welding Institute, 1985, pp. 133–139. (Rus)
20. Leonov V. P., Ataush V. Ye. et al. *Ustroystvo dlya upravleniya protsessom kontaktной tochechnoy svarki* [Device for controlling the process of resistance spot welding]. *Pat. 1214368 USSR*, 1986, bull. no. 8. (Rus)
21. Yu J. New methods of resistance spot welding using reference waveforms of welding power», *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2016, vol. 17, no. 10, pp. 1313–1321. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0156-z>
22. Mikno. Z., Stepien M., Grzesik B. Optimization of resistance welding by using electric servo actuator. *Welding in the World*, 2017, vol. 61, no. 3, pp. 453–462. — <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0437-x>
23. Shin S., Park D.-J., Yu J., Rhee S. Resistance spot welding of aluminum alloy and carbon steel with spooling process tapes. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 4, p. 410. <https://doi.org/10.3390/met9040410>

24. Moision W. C., Hetrick E. T. *System and method of welding a workpiece*. Patent US20130020288A12013. <https://patents.google.com/patent/US20130020288A1/en>
25. Steinmeier D. Upslope and downslope use in resistance welding. *microJoining Solutions-microTips™*, 2017. http://www.microjoining.com/docs/1483822194_micro-tip_resistance_up-downslope.pdf
26. Moravskiy V. E., Vorona D. S. *Tekhnologiya i oborudovaniye dlya tochechnoy i rel'yefnoy kondensatornoy svarki* [Technology and equipment for spot and relief capacitor welding]. Kyiv, Naukova Dumka, 1985. (Rus)
27. Pis'mennyi A. S., Pentegov I. V., Kislytsyn V. M. et al. [Devices for impact processing of a weld in the process of spot resistance welding]. *Avtomaticheskaya Svarka*, 2011, vol. 693, no. 1, pp. 52–55. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/102306> (Rus)
28. Bondarenko O. F., Bondarenko Iu. V., Safronov P. S., Sydorets V. M. Current and force control in micro resistance welding machines Review and development. *2013 8th International Conference on "Compatibility and Power Electronics (CPE)"*, 2013, pp. 298–303. <https://doi.org/10.1109/CPE.2013.6601173>
29. Tang H., Hou W., Hu S. J. Forging force in resistance spot welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2002, vol. 216, no. 7, pp. 957–968. <https://doi.org/10.1243/09544050260174166>
30. Charde N. Forging force in resistance spot welding: analyzing the electrically generated forging force for two different electrode actuations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 90, iss. 1–4, pp. 211–218. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9352-3>
31. Bondarenko O. F., Sydorets V. M., Bondarenko Iu. V. [Improving power supplies for contact welding]. *Visnyk Donbas'koyi derzhavnoyi mashynobudivnoyi akademiyi*, 2012, no. 28, pp. 60–63. (Rus)
32. Amada Miyachi Inc. Linear DC Weld Control UB29/UB29A/DC29 *Operation Manual*, 2013. <http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?requestURL=%2Fapex%2Fproduct%3Fcategoryid%3Dresistance-welding%26groupid%3Dw-power-supplies%26productid%3Ddc29&file=01580000001bZnJAAM>

Опис статті для цитування:

Бондаренко О. Ф. Узгодження параметрів зварювальних імпульсів з електрофізичними процесами в зварювальному контакті та програмою тиску електродів. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2019, № 5-6, с. 51–60. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.51>

Cite the article as:

Bondarenko O. F. Coordination of welding pulse parameters with electrode pressure program and electrophysical processes in welding contact. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 5-6, pp. 51–60. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.51>

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

- Гоблик Віктор Васильович*, канд. фіз.-мат. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка»
- Должиков Володимир Васильович*, докт. фіз.-мат. наук, зав. кафедрою, Харківський національний університет радіоелектроніки
- Іжнін Ігор Іванович*, докт. фіз.-мат. наук, начальник лабораторії, НВП «Карат», м. Львів
- Ільчук Григорій Архипович*, докт. фіз.-мат. наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка»
- Ніколаєнко Юрій Єгорович*, докт. техн. наук, провідний науковий співробітник, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського»
- Сафронов Павло Сергієвич*, канд. техн. наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет
- Стевич Зоран*, докт. техн. наук, професор, Факультет технічних наук Белградського університету в Борі
- Степенко Сергій Анатолійович*, канд. техн. наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет
- Трофімов Володимир Євгенійович*, канд. техн. наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет

Підписано до друку 26.12 2019 р. Формат 60×84 1/8. Друк. арк. 8,5. Тираж 100 прим. Зам. № 481

Оригінал-макет виготовлено в видавництві «Політехперіодика»

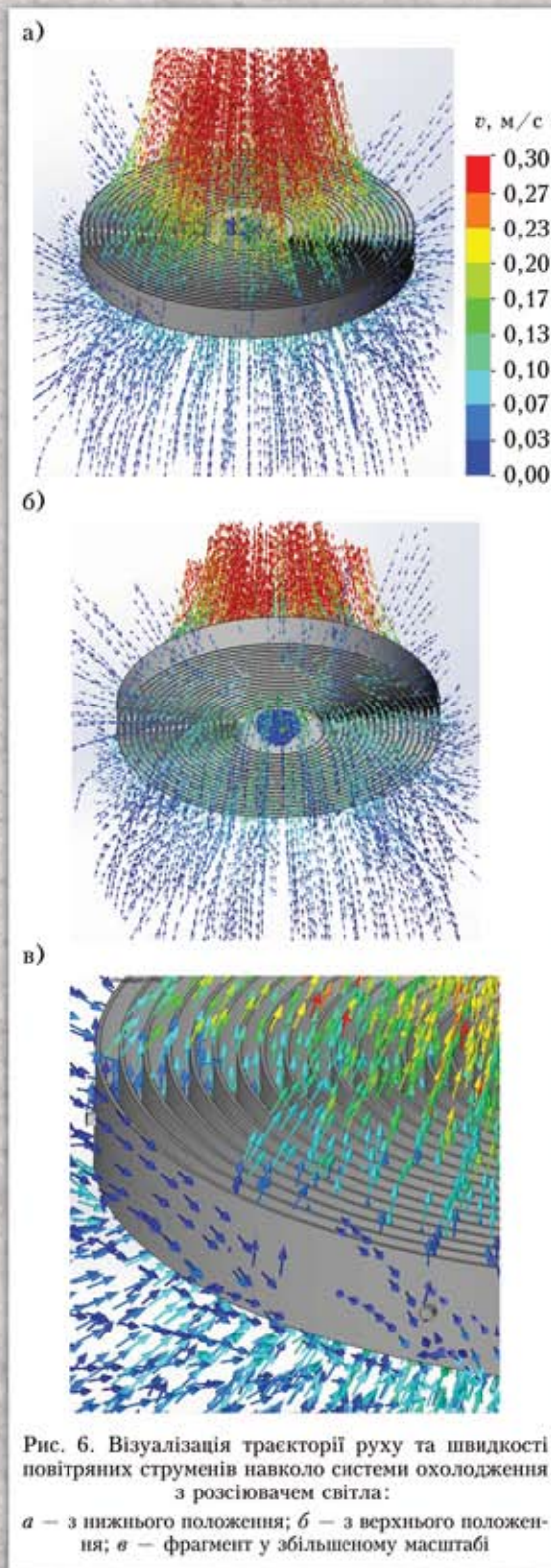
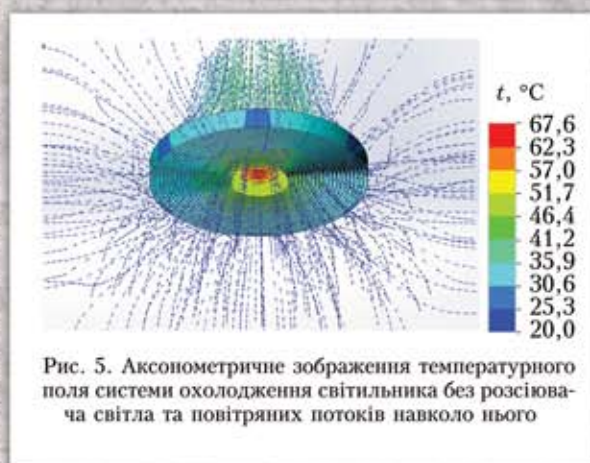
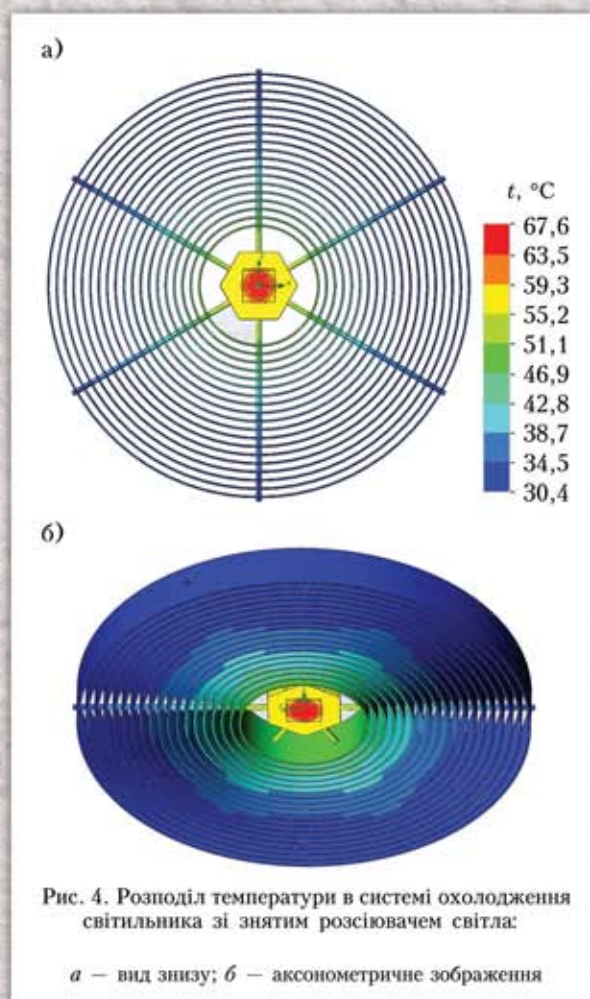
Свідцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3232 від 09.07.2008 р.

(65044, м. Одеса, а/с 17)

Надруковано ФОП Побута М. І. з готового оригінал-макету

(65044, м. Одеса, пр-т. Шевченка, 1а)

До статті
«Нова конструкція світлодіодного
світильника з тепловими трубами»



Номер готували
Белград, Гулбарга, Київ, Львів,
Одеса, Харків, Чернігів.



Пишіть
Передплачуйте
Читайте