

Технология и конструирование в электронной аппаратуре



6 2017

НОЯБРЬ — ДЕКАБРЬ

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

ISSN 2225-5818

Регистрационный номер КВ 21788-11888ПР

Выходит один раз в 2 месяца

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

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев)

Включен в международную справочную систему по периодическим и продолжающимся изданиям
"Ulrich's Periodicals Directory" (США),

в международную систему библиографических ссылок CrossRef,
в наукометрическую базу РИНЦ научной электронной библиотеки России,
в базу данных DOAJ, в Google Scholar

Номер манушцен при підтримці
НПІТ «Сатурн», (г. Київ),
ЧАО «Україналит» (г. Київ),
НПІТ «Кірат» (г. Львів),
ЦКБ «Ритм» (г. Чернівці)

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

В Украине	Отделение связи: «Каталог изданий Украины». Индекс 23785.
В России	Отделение связи: Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
В Белоруссии	Отделение связи: Каталог «Издавания стран СНГ». Индекс 23785.
В редакции «ТКЭА» можно подписаться в любого номера	

Адрес редакции: Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17.
E-mail: tkea@optima.com.ua, web-site: www.tkea.com.ua,
тел. +38 (048)728-18-50, 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, П. С. Сафронюк,
А. А. Алексеев, М. Г. Глава, Н. М. Колсанова.
Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корещук.

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2017

№ 6

Год издания 41-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Чл.-корр. НАНУ,

д.ф.-м.н. А. Е. Беляев (г. Киев)

Д.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)

Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)

Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса)

Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. С. Г. Антощук (г. Одесса)

Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)

Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)

Д.т.н. А. П. Бондарев (г. Львов)

К.т.н. А. Ф. Бондаренко (г. Киев)

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

Д.ф.-м.н. В. В. Должиков (г. Харьков)

Д.т.н. А. А. Дружинин (г. Львов),

К.т.н. И. Н. Еримич (г. Одесса)

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

Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)

Д.т.н. С. И. Круковский (г. Львов)

Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)

Чл.-корр. НАНУ,

д.ф.-м.н. В. С. Лысенко (г. Киев)

К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)

Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)

Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)

Д.ф.-м.н. С. В. Плаксин (г. Днепр)

К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)

К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)

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

Д.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)

Д. т. н. Я. Стеванович (г. Белград)

Д. т. н. З. Стевич (г. Белград)

Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)

К.т.н. В. Е. Трофимов (г. Одесса)

УЧРЕДИТЕЛИ

Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарева

Научно-производственное
предприятие «Сатурн»

Одесский национальный
политехнический университет
Издательство «Политехпериодика»

Одобрено к печати

Ученым советом ОНПУ

(Протокол № 4 от 26.12 2017 г.)

Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

СОДЕРЖАНИЕ

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Чувствительный элемент многофункционального датчика для измерения температуры, деформации и магнитного поля. *А. А. Дружинин, Ю. Н. Ховерко, А. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуй, С. Ю. Яцухненко* (на английском) 3

Дискретные фотоприемники средневолнового ИК-диапазона спектра на основе HgCdTe. *З. Ф. Цибрий, Е. В. Андреева, М. В. Апатская, С. Г. Бунчук, Н. В. Вуйчик, А. Г. Голенков, Н. В. Дмитрук, В. В. Забудский, И. А. Лысюк, Е. В. Свеженцова, М. И. Смолий, Ф. Ф. Сизов* 8

Электронные средства: исследования, разработки

Применение дилатометрического эффекта для автоматизации контактной сварки. *А. Ф. Бондаренко, А. Г. Дубко, В. М. Сидорец, Ю. В. Бондаренко* (на украинском) 14

Системы передачи и обработки сигналов

Корреляционная схема кадровой инхронизации в системах связи с QPSK-модуляцией. *А. В. Садченко, О. А. Кушниренко, О. И. Ефимов, В. В. Пунько, С. Ю. Паровой* 22

Обеспечение тепловых режимов

Конструктивно-технологические особенности имитатора теплового потока на основе алмазоподобных пленок. *Ю. Е. Николаенко, Р. С. Мельник, А. И. Руденко, С. М. Ротнер* (на английском) 29

Материалы электроники

Углеродные наностенки в автоэмиссионных катодах. *А. Ф. Белянин, В. В. Борисов, С. А. Дагесян, С. А. Евлашин, А. А. Пилевский, В. А. Самородов* (на английском) 34

Биомедицинская электроника

Термоэлектрический прибор с электронным блоком управления для диагностики воспалительных процессов организма человека. *Л. И. Анатычук, Р. Р. Кобылянский, Р. Г. Черкез, И. А. Константинович, В. И. Гошовский, В. А. Тюменцев* (на английском) 44

Список рецензентов номера

Новые книги

44

48

28

ЗМІСТ

Нові компоненти для електронної апаратури

Чутливий елемент багатофункційного датчика для вимірювання температури, деформації та магнітного поля. *А. А. Дружинін, Ю. Н. Ховерко, А. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуй, С. Ю. Яцухненко* (3)

Дискретні фотоприймачі середнього ІЧ-діапазону спектра на основі HgCdTe. *З. Ф. Цибрій, К. В. Андрєєва, М. В. Апатська, С. Г. Бунчук, М. В. Вуйчик, О. Г. Голенков, Н. В. Дмитрук, В. В. Забудський, І. О. Лисук, К. В. Свеженцова, М. І. Смолий, Ф. Ф. Сизов* (8)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Застосування дилатометричного ефекту для автоматизації контактного зварювання. *О. Ф. Бондаренко, А. Г. Дубко, В. М. Сидорець, Ю. В. Бондаренко* (14)

Системы передачи и обработки сигналов

Кореляційна схема кадрової синхронізації в системах зв'язку з QPSK-модуляцією. *А. В. Садченко, О. А. Кушніренко, О. І. Єфімов, В. В. Пунько, С. Ю. Паровий* (22)

Забезпечення теплових режимів

Конструктивно-технологічні особливості імітатора теплового потоку на основі алмазоподібних плівок. *Ю. Є. Ніколаєнко, Р. С. Мельник, О. І. Руденко, С. М. Ротнер* (29)

Матеріали електроніки

Вуглецеві наностінки в автоемісійних катодах. *А. Ф. Бєлянін, В. В. Борисов, С. А. Дагєсян, С. А. Євлашин, А. А. Пилєвський, В. А. Самородов* (34)

Біомедицина електроніка

Термоелектричний прилад з електронним блоком керування для діагностики запальних процесів організму людини. *Л. І. Анатичук, Р. Р. Кобилянський, Р. Г. Черкез, І. А. Константинович, В. І. Гошовський, В. А. Тюменцев* (44)

CONTENTS

New components for electronic equipment

Sensitive element of multifunctional sensor for measuring temperature, strain and magnetic field induction. *A. A. Druzhinin, Yu. M. Khoferko, A. P. Kuttrakov, N. S. Liakh-Kaguy, S. Yu. Yatsukhnenko* (3)

Medium wavelength infrared HgCdTe discrete photodetectors. *Z. F. Tsybrii, K. V. Andreeva, M. V. Apatska, S. G. Bunchuk, M. V. Vuichyk, O. G. Golenkov, N. V. Dmytruk, V. V. Zabudsky, I. O. Lysiuk, K. V. Svezhentsova, M. I. Smolii, F. F. Sizov* (8)

Electronic devices: research, development

Applying of dilatometric effect for resistance welding automation. *O. F. Bondarenko, A. H. Dubko, V. M. Sydorets, Iu. V. Bondarenko* (14)

Signals transfer and processing systems

Correlation scheme of frame synchronization in communication systems with QPSK-modulation. *A. V. Sadchenko, O. A. Kushnirenko, O. I. Yefimov, V. V. Punko, S. Y. Parovyi* (22)

Thermal management

Constructive and technological aspects of the heat flow imitator based on diamond-like films. *Yu. E. Nikolaenko, R. S. Melnyk, A. I. Rudenko, S. M. Rotner* (29)

Materials of electronics

Carbon nanowalls in field emission cathodes. *A. F. Belyanin, V. V. Borisov, S. A. Daghetsyan, S. A. Evlashin, A. A. Pilevsky, V. A. Samorodov* (34)

Biomedical electronics

Thermoelectric device with electronic control unit for diagnostics of inflammatory processes in the human organism. *L. I. Anatychuk, R. R. Kobylanskyi, R. G. Cherkez, I. A. Konstantynovych, V. I. Hoshovskiy, V. A. Tiumentsev* (44)

Dr. Sc. A. A. DRUZHININ, Dr. Sc. Yu. M. KHOVERKO, Dr. A. P. KUTRAKOV,
Dr. N. S. LIAKH-KAGUY, S. Yu. YATSUKHNENKO

Ukraine, Lviv Polytechnic National University
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

SENSITIVE ELEMENT OF MULTIFUNCTIONAL SENSOR FOR MEASURING TEMPERATURE, STRAIN AND MAGNETIC FIELD INDUCTION

Sensitive element of multifunctional sensor for measuring temperature, strain and magnetic field induction has been developed based on the studies of electrical conductivity and magnetoresistance of silicon and germanium microcrystals in the temperature range 4.2–70 K, strain $\pm 1.5 \cdot 10^{-3}$ rel.un. and magnetic fields of 0–14 T. The feature of the sensitive element is the using of the p- and n-type conductivity germanium microcrystals as mechanical and magnetic field sensors, respectively, and the p-type silicon microcrystal – as temperature sensor. That allows providing the compensation of temperature influence on piezoresistance and on sensitivity to the magnetic field.

Keywords: sensitive element of multifunctional sensor, silicon and germanium microcrystals, magnetoresistance, cryogenic temperatures.

High-sensitivity, high-speed devices and solid-state electronics components operating under hard conditions of exploitation are widely used in modern technology, in particular in aerospace engineering, cryoelectronics, etc. [1–4]. However, deep cooling is necessary for the operation of such devices, and that significantly limits their using. In addition, a number of requirements are advanced to modern devices such as multi-functionality, miniature size, high precision of conversion, stability that can be achieved due to new structural and circuit design solutions [1–5].

Known multifunction sensors for simultaneous measurements of several parameters, such as temperature, strain, pressure, magnetic field, etc. need high-value special equipments and materials due to the use of the complex microelectronic technologies [6–8].

The authors of the paper [9] describe the construction of a multi-functional sensor for measuring strain, magnetic field and temperature, in which a thermistor based on a silicon whisker was used as a measuring element. The sensor was based on the single whisker that leads to a significant impact of the measured parameters on each other, and as a result, that has led to the reduction of measurement accuracy. However, this design does not allow providing the compensation of temperature influence on the sensor piezoresistance and the temperature dependence of the sensitivity to the magnetic field.

This work was devoted to the creation of the multifunctional sensor for measuring temperature in the range of 4.2–70 K, under strain of $\pm 1.5 \cdot 10^{-3}$ rel. un. and magnetic fields up to 14 T. The sensor was made using a simple technology that meets the current requirements for the primary converters.

Experimental procedure

The silicon and germanium whiskers grown by the method of chemical transport reactions in a closed bromide system were selected to create the sensitive elements of the multifunctional sensor [10]. The corresponding source material, silicon or germanium, was loaded into a quartz tube. The gold impurity was used as the initiator of the whisker growth. Silicon whiskers were doped with boron, and germanium whiskers – with gallium during their growth, to obtain the p-type conductivity. The germanium whiskers were also doped with antimony to obtain the n-type conductivity. Silicon whiskers have the doping concentration of $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, and germanium whiskers – $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. The temperature of the crystallization zone was 700–800°C, and the temperature of the evaporation zone was 1000°C. The silicon and germanium whiskers with a diameter of 3–9 μm and the length 2–4 mm were selected for the studying.

The original and easy-to-implement technique proposed by the authors of [11] was used to provide uniaxial compressive and tensile strain for the

studied whiskers at cryogenic temperatures. Thus, the uniaxial strain of the silicon and germanium whiskers is created by the changing of the temperature due to the difference in coefficients of thermal expansion of the crystal and the substrate material. The whiskers were mounted on the substrates with different materials by using a glue of VL-931 with the polymerization temperature of $+180^{\circ}\text{C}$.

The p - and n -type conductivity the silicon and germanium whiskers were placed on a special beam and installed in a helium cryostat where they were cooled to a temperature of liquid helium for the studying of the magnetoresistance and strain characteristics.

The influence of the magnetic field on the whisker properties were studied on a Bitter magnet with an induction up to 14 T and with the scan time in the field of 1.75 T/min in the temperature range 4.2–70 K.

The stabilized electric current through the whisker has determined by the current source Keithley 224 within range 1–100 μA depending on the resistance for investigated whiskers. The temperature has measured with using Cu-CuFe thermocouple.

The electric voltage at the whisker contacts, the output signal of the thermocouple and the magnetic field sensor were measured by digital voltmeters Keithley 199 and Keithley 2000 with an accuracy up to $1 \cdot 10^{-6}$ V. The simultaneous automatic registration of indicators on devices was carried out due to the parallel port of the personal computer and further their visualization on the monitor screen.

The studies in the temperature range 4.2–70 K and magnetic fields up to 14 T were carried out in the International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures (Wroclaw, Poland).

Experimental results and discussion

The results of the investigations of the temperature dependence of the resistance R in the p -type conductivity Si whiskers are presented in Fig. 1. The dependences of relative change of the resistance vs applied uniaxial strain ($\Delta R_{\epsilon}/R_0$) and the magnetic field induction ($\Delta R_B/R_0$) at different temperatures in the range 4.2–70 K for both types of conductivity Ge whiskers were shown in Fig. 2 and Fig. 3.

The obtained data show that:

- the resistance sensitivity to the temperature change in the studied range is 0.42 Ohm/K for the p -type conductivity Si whiskers (Fig. 1);
- the resistance sensitivity to the maximum strain change ($1.5 \cdot 10^{-3}$ rel. un.) at liquid helium

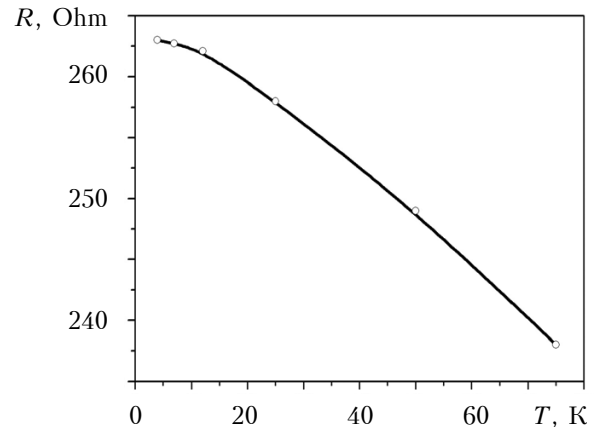


Fig. 1. The temperature dependence of the resistance in the p -type conductivity Si whiskers

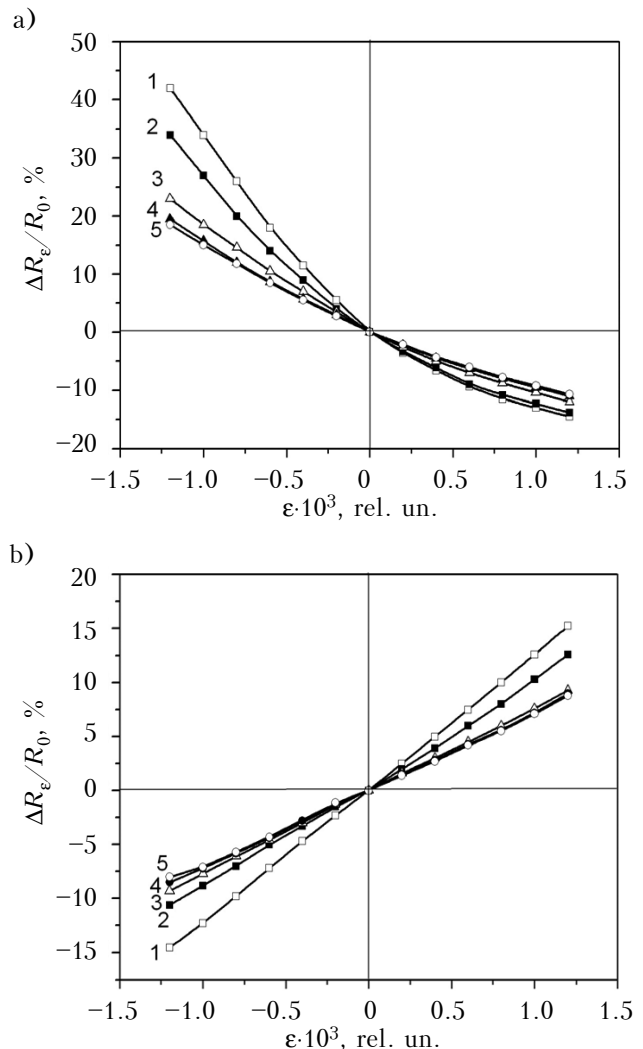


Fig. 2. The dependences of relative change of the resistance vs applied uniaxial strain for the n - (a) and p -type conductivity (b) Ge whiskers at different temperature:

1 – 4.2 K; 2 – 14 K; 3 – 24 K; 4 – 42 K; 5 – 70 K

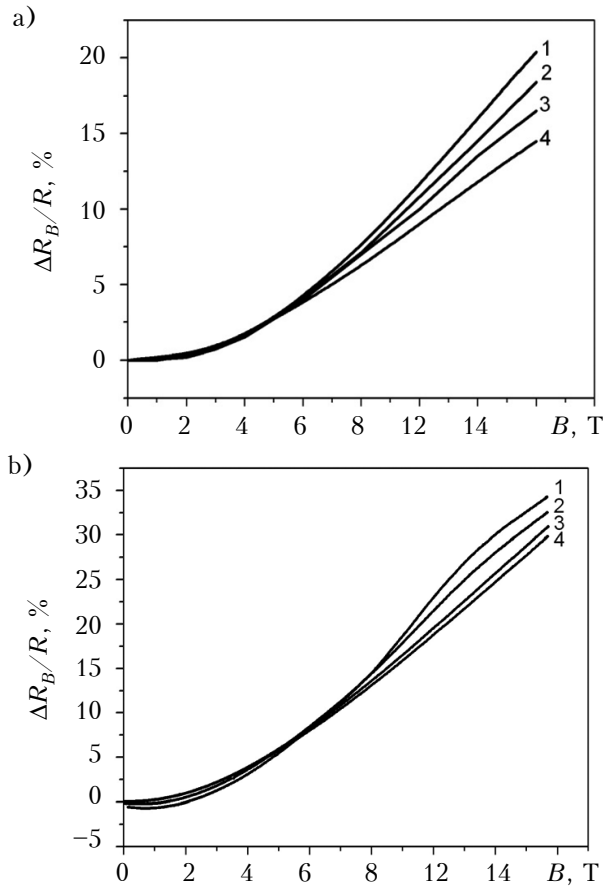


Fig. 3. The dependences of relative change of the resistance vs the magnetic field induction for the *n*- (a) and *p*-type conductivity of (b) Ge whiskers at different temperature:
1 – 4.2 K; 2 – 14 K; 3 – 24 K; 4 – 42 K; 5 – 70 K

temperature is more than 40% for the *n*-type conductivity Ge whiskers and it's about 15% for the *p*-type Ge whiskers (Fig. 2);

– the resistance sensitivity to the change in magnetic field induction from 0 to 14 T at temperature 14 K is about 20% for the *n*-type conductivity Ge whiskers and it's about 35% for the *p*-type Ge whiskers (Fig. 3).

Therefore, the obtained data indicate that the *p*-type conductivity silicon whiskers could be used as the temperature sensors in the range of 4.2 – 70 K, and the *p*- and *n*-type germanium whiskers – as the mechanical and magnetic field sensors, respectively.

Sensitive element of multifunctional sensor

The conducted studies allowed designing the sensitive element of the multifunctional sensor for measuring strain, magnetic field induction and temperature (Fig. 4).

The developed sensitive element of the multifunctional sensor was operated due to the simul-

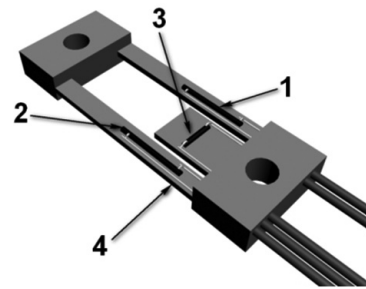


Fig. 4. Schematic image of the sensitive element of the multifunctional sensor:

1, 2, 3 – mechanical, magnetic field induction and temperature sensors, respectively; 4 – elastic element

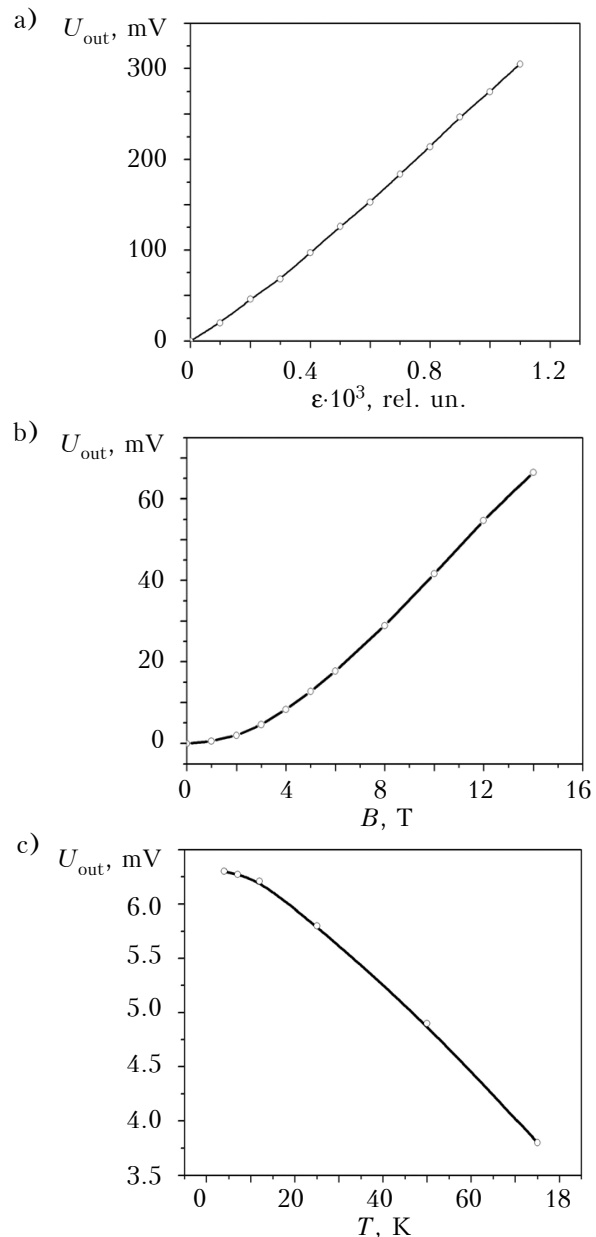


Fig. 5. The output signal of the multifunctional sensor for measuring strain (a), magnetic field induction (b) and temperature (c)

taneous using of three sensors with different types of conductivity: the temperature sensor — based on the *p*-type conductivity silicon whisker, the mechanical, magnetic field induction sensors — on the basis of the *n*- and *p*-type conductivities germanium whiskers, respectively. All three primary converters have mounted on the elastic element as shown in Fig. 4.

The sensitive elements of the multifunctional sensor for the measuring strain and magnetic field induction have switched in the adjacent shoulders of the bridge measuring circuit. As a result, the output signal of the circuit caused by the influence of deformation is determined by the difference in signals, while the signal caused by the effect of the magnetic field is determined by the sum of the signals.

The temperature sensor based on the *p*-type conductivity silicon whiskers, which are weakly sensitive to the influence of the magnetic field, was used to provide the compensation of temperature influence on the sensor piezoresistance [12]. Therefore, the compensation of temperature influence on piezoresistance and on sensitivity to the magnetic field in the multifunctional sensor were carried out by the electronic processing unit taking into account the output signal from the temperature sensor [13].

Output signals from three sensors of the multifunction sensor are shown in Fig. 5.

The output signal of the mechanical sensor reaches up to 300 mV at temperature 70 K, which corresponds to the strain level of $1,2 \cdot 10^3$ rel. un. (Fig. 5, *a*). And the output signal of the magnetic field sensor is about 65 mV at induction 14 T (Fig. 5, *b*).

Conclusions

Consequently, the sensitive elements of the multifunctional sensor for the measuring temperature, strain and magnetic field induction designed as the result of carried out studies that allows increaseing the accuracy of the measured parameters and extend the range of the magnetic field measurements up to 14 T in comparison with the existing analogues. The sensitivity of the temperature sensor is 0.42 Ohm/K in the temperature range of 4.2–70 K, the sensitivity of the mechanical sensor at liquid helium temperature reaches up to 40% and the sensitivity of the magnetic field sensor at induction 14 T is about 35%.

REFERENCES

1. A. A. Barlian, S. J. Park, V. Mukundan, B. L. Pruitt, Design and characterization of microfabricated piezoresis-

tive floating element-based shear stress sensors. *Sensors and Actuators*, A., 2007, vol. 134, pp. 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.04.035>

2. Baranskii P., Fedosov A., Gaidar G. *Fizichni vlastivosti kristaliv kremniyu ta germaniyu v polyakh efektyvnogo zovnishn'ogo vplivu* [Physical properties of Si and Ge crystals in the fields of effective external influence], Lutsk, Nadstyrja, 2000, 280 p. (Ukr)

3. Egorov A. A. System, operating principles and applications of sensors. *Journal radioelectronics*, 2009, no 3, pp. 1-22. (Rus)

4. Voitovich I. D., Korsuns'kii V. M. *Intelektualni sensori* [Intelligent Sensors]. Kiev, Institute of Cybernetics of NASU, 2007, 514 p. (Ukr)

5. Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P., Khoverko Yu. M., Liakh-Kaguj N. S., Kogut Iu. R. Strain effect on magnetoresistance of SiGe solid solution whiskers at low temperatures, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2011, vol. 14, no 1, pp.18-22. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2010.12.012>

6. Druzhinin A.A., Khoverko Yu.M., Kuttrakov A.P., Koretskii R.M., Yatsukhnenko S.Yu. [Two-functional sensor of magnetic field and deformation based on microcrystals Si <B,Ni>]. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2017, no 3, pp. 24-29. (Ukr). <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.3.24>

7. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Koretskii R. Strain-induced effects in p-type Si whiskers at low temperatures, *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 40, 2015, pp.766-771. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.015>

8. Alejnikov A. F., Capenko M.P. Multifunction Sensors, Handbook: Measurement, control, automation, vol. 2(74), 1990, pp. 50-57 (Rus)

9. Patent of Ukraine N28394, [Multifunction sensor]. R. I. Bajcar, S. S. Varshava, A. V. Prohorovich, E. F. Venger Bul. no 5, 2000. (Ukr)

10. Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P. Investigation of Si-Ge whiskers growth by CVD, *Physica Status Solidi (C)*, 2004, vol.1(2), pp. 333-336. <https://doi.org/10.1002/pssc.200303948>

11. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Oszwaldowski M., Berus T., Kunert H. Studies of piezoresistance and piezomagnetoresistance in Si whiskers at cryogenic temperatures", *Crystal Research and Technology*, 2002, vol. 37(2-3), pp. 243-257. [http://dx.doi.org/10.1002/1521-4079\(200202\)37:2/3<243::AID-CRAT243>3.0.CO;2-L](http://dx.doi.org/10.1002/1521-4079(200202)37:2/3<243::AID-CRAT243>3.0.CO;2-L)

12. Patent of Ukraine N95398, [Method of the compensation of temperature influence on piezoresistance]. A. Druzhinin, A.Kuttrakov, N. Liakh-Kaguj, Lviv Polytechnic National University, Bul. no 4. (Ukr)

13. Patent of Ukraine N106175, [Multifunction sensor]. A. A. Druzhinin, O.P. Kuttrakov, N. S. Liakh-Kaguj. Lviv Polytechnic National University, Bul. no 8. (Ukr)

Received 02.11 2017.

DOI: 10.15222/TKEA2017.6.03
УДК 621.315.592

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, д. т. н. Ю. Н. ХОВЕРКО,
к. т. н. А. П. КУТРАКОВ, к. т. н. Н. С. ЛЯХ-КАГУЙ,
С. Ю. ЯЦУХНЕНКО

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ БАГАТОФУНКЦІЙНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ, ДЕФОРМАЦІЇ ТА МАГНІТНОГО ПОЛЯ

На основі результатів дослідження залежності опору мікрокристалів кремнію і германію від температури, деформації та магнітного поля розроблено чутливий елемент багатофункційного датчика для вимірювання температури в інтервалі 4,2–70 К, деформації $\pm 0,0015$ відн. од. та індукції магнітного поля до 14 Тл. Особливістю чутливого елемента є використання мікрокристалів кремнію р-типу провідності як сенсора температури, а мікрокристалів германію р- і n-типу як сенсорів деформації і магнітного поля відповідно, що дозволило забезпечити компенсацію впливу температури на тензочутливість і чутливість до магнітного поля.

Ключові слова: чутливий елемент багатофункційного датчика, мікрокристали кремнію і германію, магнітоопір, криогенні температури.

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, д. т. н. Ю. Н. ХОВЕРКО,
к. т. н. А. П. КУТРАКОВ, к. т. н. Н. С. ЛЯХ-КАГУЙ,
С. Ю. ЯЦУХНЕНКО

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДЕФОРМАЦИИ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ

На основе результатов исследования зависимости сопротивления микрокристаллов кремния и германия от температуры, деформации и магнитного поля разработан чувствительный элемент многофункционального датчика для измерения температуры в интервале 4,2–70 К, деформации $\pm 0,0015$ отн. ед. и индукции магнитного поля до 14 Тл. Особенностью чувствительного элемента является использование микрокристаллов кремния р-типа проводимости в качестве сенсора температуры, а микрокристаллов германия р- и n-типа в качестве сенсоров деформации и магнитного поля соответственно, что позволило обеспечить компенсацию влияния температуры на тензочувствительность и чувствительность к магнитному полю.

Ключевые слова: чувствительный элемент многофункционального датчика, микрокристаллы кремния и германия, магнитосопротивление, криогенные температуры.

К. ф.-м. н. З. Ф. ЦИБРИЙ, Е. В. АНДРЕЕВА, М. В. АПАТСКАЯ, С. Г. БУНЧУК,
к. ф.-м. н. Н. В. ВУЙЧИК, к. ф.-м. н. А. Г. ГОЛЕНКОВ, Н. В. ДМИТРУК,
к. ф.-м. н. В. В. ЗАБУДСКИЙ, к. ф.-м. н. И. А. ЛЫСЮК, к. ф.-м. н. Е. В. СВЕЖЕНЦОВА,
М. И. СМОЛИЙ, член-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. Ф. Ф. СИЗОВ

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

E-mail: tsybrii@isp.kiev.ua

ДИСКРЕТНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ СРЕДНЕВОЛНОВОГО ИК-ДИАПАЗОНА СПЕКТРА НА ОСНОВЕ HgCdTe

Разработана топология и технологические режимы изготовления дискретных фотодиодов (диаметр 0,5–1,5 мм) средневолнового инфракрасного диапазона спектра на базе эпитаксиальных слоев кадмий-ртуть-теллур (КРТ). Исследованы оптические, фотоэлектрические и вольт-амперные характеристики дискретных КРТ-фотодиодов для спектрального диапазона 3–5 мкм с целью достижения необходимых эксплуатационных параметров. Установлено, что полученные фотодиоды могут работать в режимах, ограниченных флуктуациями фонового излучения (BLIP-режим).

Ключевые слова: HgCdTe, фотодиод, ИК-диапазон, ВАХ.

Для охлаждаемых приемников инфракрасного (ИК) излучения имеются уже сформированные технологии с хорошо определенной архитектурой, а их применение хорошо известно. Тем не менее, существуют возможности для улучшения спектрального диапазона и разрешения при одновременном понижении цены, размера приборов, их массы и мощности, а также для расширения области использования ИК-визуализации для целей двойного назначения, национальной безопасности и коммерческих приложений. При изготовлении ИК-детектора самым важным фактором, возможно, является используемый материал. На данный момент многие исследователи и производители фотодиодов утверждают, что наилучшим полупроводниковым материалом для ИК-детекторов является кадмий-ртуть-теллур (КРТ) [1–3], что обусловлено возможностью изменения края фоточувствительности изменением химического состава КРТ. Это позволяет, например, уменьшить уровень шумов фотоприемника, поскольку ширина запрещенной зоны для диапазона фоточувствительности может быть выбрана в точном соответствии спектральному диапазону фотоответа.

Энергетическая зонная структура HgCdTe характеризуется такими особенностями, как:

- возможность задавать ширину запрещенной зоны при выращивании пленок с высокой пространственной однородностью и низкой плотностью дислокаций ($< 1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$) несколькими эпитаксиальными методами (жидкофазной, молекулярно-лучевой, металлоорганической газофазной эпитаксией) на согласованных по постоянной решетки и прозрачных в ИК-диапазоне подложках CdZnTe;

- низкая концентрация неосновных носителей заряда ($< 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$);

- наличие подходящих легирующих примесей для создания *n*- и *p*-типа проводимости;

- универсальные методы для формирования мезоструктур и планарных гомо- и гетеропереходов;

- относительно небольшое значение диэлектрической константы, что является важным для емкости *p–n*-перехода;

- возможность использования CdTe в качестве пассивационного покрытия, что способствует реализации фотодиодов с низким значением $1/f$ -шума и высокой радиационной стойкостью [4].

Такое сочетание зонной структуры и свойств материала позволяет получать качественные ИК-детекторы (в т. ч. фотосопротивления, одно- и мультиспектральные фотодиоды, фотодиодные матрицы) с рабочими характеристиками, близкими к теоретически возможным, и изменять граничную длину волны в диапазоне 1,5–20 мкм.

Крупноформатные фотовольтаические матрицы являются основой для технологии изготовления широко применяемых гибридных фотоприемных устройств (ФПУ) [5]. Наибольшее распространение получили матрицы из $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,2–0,3$) для спектрального диапазона 8–12 и 3–5 мкм. ФПУ на 8–12 мкм обеспечивают наилучшую температурную чувствительность и помехозащищенность в условиях задымленности и запыленности. В этом спектральном диапазоне находится максимум собственного теплового излучения тел, находящихся при температуре 300 К. Согласно закону смещения Вина, максимум собственного теплового излучения тел при их нагревании смещается в коротковолновую область, поэтому для более нагретых тел оптимальным является спектральный диапазон 1–5 мкм. Для $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

($x \approx 0,3$) есть возможность изготовления матриц на спектральный диапазон 3–5 мкм. Их рабочая температура может быть повышена до 120–150 К без ухудшения характеристик, обеспечивающих функционирование в режимах, ограниченных фоновым излучением, что является невозможным для матриц на основе InSb. Это обусловлено как разными коэффициентами температурного расширения запрещенной зоны E_g (в HgCdTe $dE_g/dT > 0$, а в InSb $dE_g/dT < 0$), так и изначально более коротковолновой границей фоточувствительности фотоприемников на основе HgCdTe на область спектра 3–5 мкм (красная граница фоточувствительности λ_{co} фотоприемников на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \approx 0,3$) составляет около 5,0 мкм, а на основе InSb — 5,6 мкм при $T \approx 80$ К). Эквивалентная шуму разность температур для матриц этого спектрального диапазона при 80 К равна 7–20 мК [5, 6].

Для некоторых специальных приложений актуальным является вопрос создания дискретных фотодиодов с большой площадью чувствительных элементов ($\varnothing 1,25$ или $3,2 \times 3,2$ мм, напр., [7]) с возможностью получения больших сигналов, дальности обнаружения и т. д.

Целью данного исследования была разработка ИК-фотодиодов средневолнового диапазона ($\lambda = 3–5$ мкм, $T \approx 80$ К) с диаметром чувствительных элементов $d_{\text{чз}} = 0,5–1,5$ мм на структурах HgCdTe, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, и исследование их оптических, электрических и фотоэлектрических характеристик для достижения необходимых эксплуатационных параметров.

Формирование фоточувствительных структур

Твердые растворы кадмий-ртуть-теллур являются нестойкими к механическим напряжениям и повышенной температуре. Физико-химические свойства этого материала накладывают свои требования к температурным режимам проведения технологических процессов и ограничивают возможность использования стандартных операций, принятых в микроэлектронике, что обусловило необходимость разработки некоторых технологических решений.

Для изготовления ИК-фотодиодов на основе узкозонного полупроводника HgCdTe использовались слои, выращенные методом жидкофазной эпитаксии на подложках $Cd_{1-y}Zn_yTe$ ($y \approx 0,03–0,05$), имеющих близкие параметры решеток, что позволяет получать структуры с малым количеством дислокаций ($< 10^5 \text{ см}^{-2}$) на металлургической границе раздела и самих слоев. Эпитаксиальные слои $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \approx 0,3$) p -типа проводимости характеризовались высокой однородностью состава по площади образца ($\leq 10^{-3}$ мольных долей CdTe), концентрация дырок составляла $N_p \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$, холловская под-

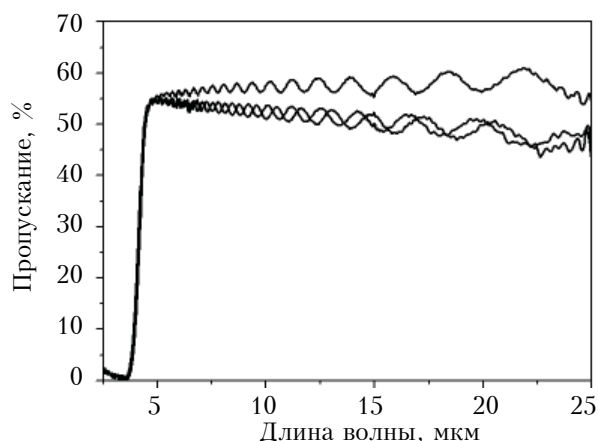


Рис. 1. Спектральные зависимости оптического пропускания эпитаксиальных пленок КРТ, измеренные с помощью ИК-Фурье-спектрометра "Spectrum BX-II" при $T = 300$ К

вижность $\mu_{77} \approx 400–450 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Толщина пленок КРТ изменялась в пределах 15–20 мкм.

На рис. 1 приведены спектральные зависимости ИК-пропускания эпитаксиальных слоев $Hg_{1-x}Cd_xTe$ при $T = 300$ К. Эти спектры, полученные при данной температуре, обычно используются для определения длинноволновой границы фотосоответа λ_{co} при температуре функционирования КРТ-приемников $T \approx 80$ К на уровне 50% максимального коэффициента пропускания T_{max} [8].

Из данных по оптическому пропусканию (рис. 1) было найдено, что $\lambda_{co} \approx 4,11$ мкм, что соответствует ширине запрещенной зоны $Hg_{1-x}Cd_xTe$ $E_g = 0,3017 \text{ эВ}$ ($x \approx 0,309$, $\lambda_{co} \approx 4,11$ мкм при $T \approx 80$ К).

Из рис. 1 видно, что кривые оптического пропускания характеризуются четким и резким краем, что свидетельствует об отсутствии толстого переходного слоя с градиентным составом между подложкой и пленкой, а наличие интерференции свидетельствует о хорошем качестве эпитаксиальных пленок КРТ.

Процесс изготовления фотодиодов состоит из многих технологических операций, включая нанесение защитного покрытия, фотолитографические процессы для формирования окон под имплантацию и формирования металлических покрытий, химическую обработку поверхности, разделение пластины на отдельные чипы, монтаж, корпусировку, формирование электрических контактов и др.

Свойства ИК-КРТ-фотодиодов существенно зависят от химической и электронной структуры поверхности, поэтому существует необходимость в создании пассивационного покрытия для уменьшения поверхностных токов и предотвра-

щения деградации структур. В качестве пассивационного покрытия нами использовался теллурид кадмия, который наносился методом молекулярной эпитаксии «горячая стенка» в специально подобранных режимах, предотвращающих длительный нагрев структуры HgCdTe/CdZnTe, который может привести к изменению химического состава поверхностного слоя КРТ. Пассивационные слои CdTe характеризовались мелкозернистой поликристаллической структурой, а их толщина составляла примерно 60 нм и контролировалась с помощью эллипсометрических измерений.

Для создания $p-n$ -переходов в узкозонном полупроводнике HgCdTe использовался метод ионной имплантации B^+ с дозой $(2-3) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. При этом основным механизмом формирования легированной области является тот, когда ионы бора выбивают атомы ртути, которые переходят в междоузлия, становясь электрически активными дефектами, ответственными за создание n -области $p-n$ -перехода.

При формировании металлических контактов к фоточувствительным элементам необходимо провести ряд технологических операций, в том числе вскрытие окон в пассивационном слое CdTe для создания омического контакта, нанесение металлического покрытия и формирование топологии фотодиода методом травления нанесенного металла без нарушения защиты остальных участков чипа. Достичь этого удалось благодаря технологическому решению, устанавливающему определенный порядок проведения фотолитографических операций, что позволило использовать фоторезист для защиты пассивации от воздействия агрессивных химических травителей. В качестве металла для контактов использовался индий, который наносился методом термического вакуумного распыления в установке с безмасляной откачкой. Толщина пленки и ее латеральные размеры контролировались с помощью интерференционного 3D-профилометра «Микрон-альфа» (рис. 2). Толщина нанесенного слоя индия составляла $1-2 \text{ мкм}$, что является достаточным для формирования электрических контактов методом ультразвуковой сварки.

В результате проведенного технологического цикла были изготовлены массивы КРТ-фотодиодов с площадью A_d чувствительных элементов, равной $0,785 \cdot 10^{-2}$ и $1,77 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ (рис. 3). После контроля электрофизических параметров пластину разделяли на дискретные фотодиоды, к которым затем формировали электрические контакты, далее фотодиоды монтировали в корпусе и помещали в криостат для контроля их фотоэлектрических параметров.

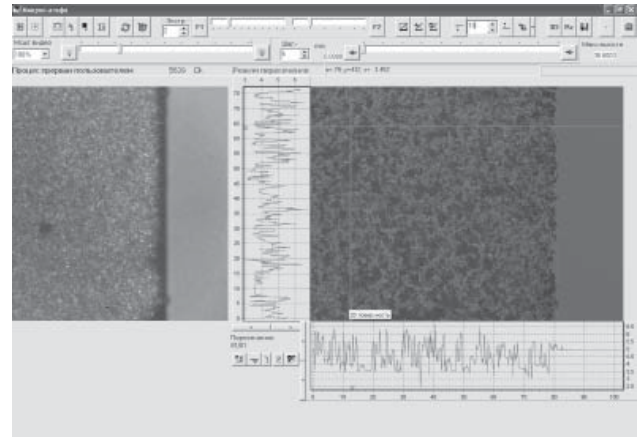


Рис. 2. Фотографии металлической пленки, нанесенной на шину КРТ-чипа:

слева — изображение в оптическом микроскопе; справа — 2D-профиль толщины пленки In, выращенной на поверхности фотодиода

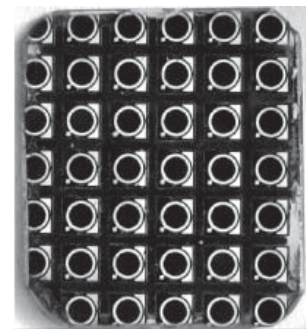
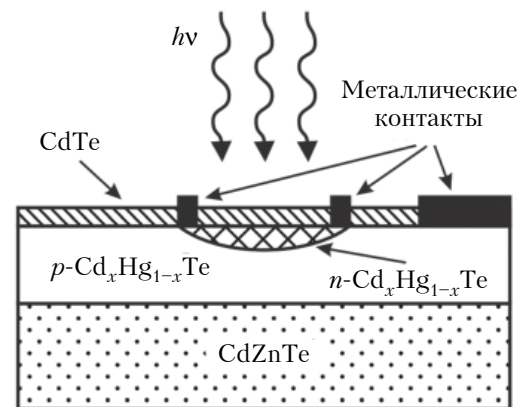


Рис. 3. Конструкция фотодиода и фотография массива КРТ-фотодиодов для средневолнового ИК-диапазона с $d_{чз} = 1,5 \text{ мм}$

Полученные результаты и их обсуждение

Предельные характеристики фотодиодов определяются величиной тока детектора при обратном смещении и произведением динамического сопротивления при нулевом смещении на площадь фоточувствительного элемента $R_0 A_d$ при температуре 77 К [9]. Темновой ток должен быть минимизирован для увеличения чувствительно-

сти фотодетектора. Доминирующими механизмами, вносящими вклад в темновой ток HgCdTe-фотодиодов, являются диффузионный ток, межзонное туннелирование, Оже-рекомбинация, туннелирование через ловушки и рекомбинационный процесс Шокли—Рида—Холла. Два последних механизма обусловлены процессами токопереноса через уровни ловушек в запрещенной зоне.

Обнаружительная способность D^* является нормализованным параметром, который характеризует качество дискретных фотоприемников и сочетает в себе такие характеристики, как чувствительность и шум фотоприемника, связанный с флуктуациями потока фотонов фонового излучения [6]:

$$D^* = (A_d \cdot \Delta f)^{1/2} / NEP = S_I (A_d \cdot \Delta f)^{1/2} / I_{ш}, \quad (1)$$

где Δf — ширина полосы усилительного тракта;
 NEP — эквивалентная шуму мощность (noise equivalent power), $NEP = I_{ш} / S_I$;

S_I — спектральная чувствительность;

$I_{ш}$ — шумовой ток.

Значение NEP определяется также другими шумами фотоприемника. Если учитывать еще и тепловой шум (шум Джонсона—Найквиста), определяемый динамическим темновым сопротивлением фотодиодов $R_0 = -[dI/dU(I)]_{U=0}^{-1} = \beta k_B T / (qI_0)$, где U — напряжение смещения; β — коэффициент неидеальности диода, то в этом случае шумовой ток будет определяться флуктуациями и потока фотонов фонового излучения и плотностью потока фонового излучения N_{ϕ} .

В [10] приведена формула для оценки плотности потока фонового излучения

$$N_{\phi} = \frac{\Omega_i}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_{co}} \frac{2\pi c}{\lambda^4 \left(\exp \frac{hc}{k_B T \lambda} - 1 \right)} d\lambda; \quad (2)$$

где c — скорость света;

Ω_i — пространственный угол зрения, определяемый холодной диафрагмой приемника излучения, $\Omega_i = \pi \sin^2 \theta_i$;

θ_i — плоский угол зрения;

k_B — постоянная Больцмана.

Пределы интегрирования в формуле (2) $\lambda_{co} = 5$ мкм и $\lambda_1 = 3$ мкм определяют область спектральной чувствительности фотоприемника.

Было найдено, что $N_{\phi} = 6,5 \cdot 10^{15}$ см⁻²·с⁻¹ для $\Omega_i = 1,57$ ср ($\theta_i = 90^\circ$) и $N_{\phi} \approx 8,8 \cdot 10^{14}$ см⁻²·с⁻¹ для $\Omega_i = 0,21$ ср ($\theta_i = 30^\circ$) при температуре фона $T = 300$ К.

Для двух указанных выше видов шумов и идеального фотодиода выражение (1) для нахождения обнаружительной способности может быть записано в виде [10]

$$D_{\lambda_{co}}^* = \frac{\eta q \lambda_{co}}{hc} \left(\frac{4k_B T}{R_0 A_d} + 2q^2 \eta N_{\phi} \right)^{-1/2}, \quad (3)$$

где η — квантовая эффективность фотодиода;

q — заряд электрона.

В режиме ограничения фоном (BLIP-режим), проведенные в [10] расчеты показали, что для указанных углов зрения обнаружительная способность $D_{\lambda_{co}}^*$ при $\lambda_{co} = 5$ мкм составляет $1,5 \cdot 10^{11}$ и $4,2 \cdot 10^{11}$ см·Гц^{1/2}/Вт, а удельная обнаружительная способность для спектрального диапазона $\lambda = 3-5$ мкм — $2,0 \cdot 10^{10}$ и $5,5 \cdot 10^{10}$ см·Гц^{1/2}/Вт соответственно.

При $4k_B T / (R_0 A_d) \ll 2q^2 \eta N_{\phi}$ (т. е. при больших значениях $R_0 A_d$) величина $D_{\lambda_{co}}^*$ определяется вторым слагаемым в скобках выражения (3), и приемник работает в BLIP-режиме, обусловленном флуктуациями потока фотонов в фоновом излучении.

При $4k_B T / (R_0 A_d) \gg 2q^2 \eta N_{\phi}$ (т. е. при низких значениях $R_0 A_d$ или в условиях низких фоновых нагрузок, например в астрономических приложениях) функционирование фотодиода определяется его динамическим сопротивлением и тепловым шумом. Также, при низких значениях $R_0 A_d$ и при наличии значительного шума, связанного с большими потоками фонового излучения, через диод будут течь большие токи, обусловленные его невысоким качеством (функционирование фотодиода определяется его динамическим сопротивлением). При приведенных выше значениях потока фоновых фотонов N_{ϕ} эффективная фоновая нагрузка $W_{эфф}$ составляет $3,3 \cdot 10^{-4}$ и $4,4 \cdot 10^{-5}$ Вт/см² соответственно.

Для обеспечения функционирования фотодиодов средневолнового ИК-диапазона ($\lambda = 3-5$ мкм) в BLIP-режиме при указанных значениях угла зрения из формулы (3) следует требование $R_0 A_d \geq 5 \cdot 10^3$ Ом·см².

Для контроля электрических параметров изготовленных фотодиодов использовали их вольт-амперные характеристики (ВАХ), которые измеряли микронзондовым методом при азотных температурах на специально разработанном оборудовании [11]. На рис. 4 приведена типичная ВАХ одного из изготовленных дискретных фо-

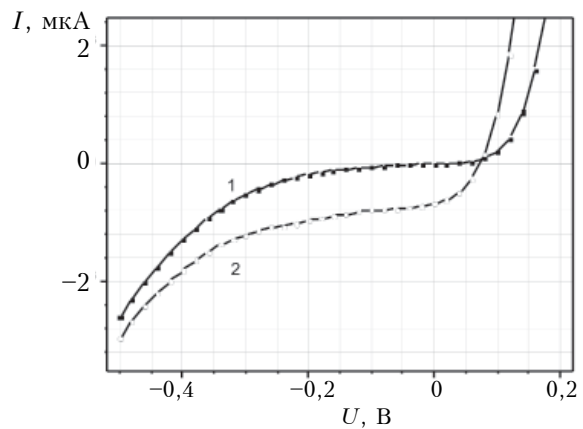


Рис. 4. Темновая (1) и полученная при фоновом освещении (2) ВАХ дискретного КРТ-фотодиода (№ 8) с $d_{\text{чз}} = 1,5$ мм для спектрального диапазона 3—5 мкм, измеренные при $T = 77$ К

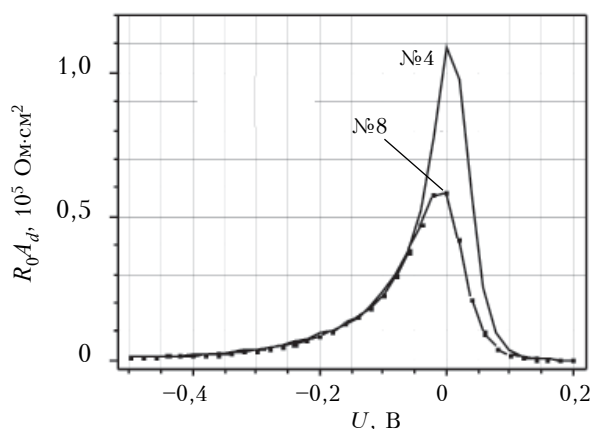


Рис. 5. Зависимости параметра $R_0 A_d$ от напряжения смещения, полученные для двух (№ 4 и № 8) дискретных КРТ-фотодиодов с $d_{\text{чз}} = 1,5$ мм

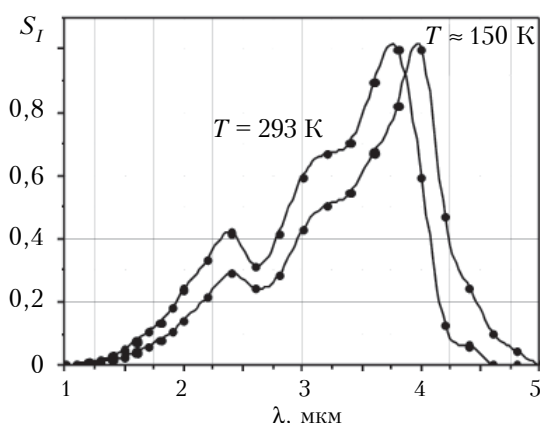


Рис. 6. Спектральные характеристики чувствительности фотодетектора на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \approx 0,3$) при комнатной температуре и при охлаждении до 150 K

тодиодов (№ 8) $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \approx 0,309$). Анализ ВАХ показал, что темновой ток данного фотодиода при рабочем напряжении смещения -100 мВ составляет примерно 44 нА и возрастает при фоновом освещении более чем в 10 раз — до значения 770 нА.

На рис. 5 показаны зависимости параметра $R_0 A_d$ от напряжения смещения для двух (№ 4 и № 8) дискретных фотодиодов. Здесь видно, что при нулевом смещении значение $R_0 A_d$ для них составляет $1,08 \cdot 10^5$ и $0,57 \cdot 10^5$ Ом·см². То есть все диоды, даже с наименьшим значением $R_0 A_d$, удовлетворяют требованию $R_0 A_d \geq 5 \cdot 10^3$ Ом·см² и могут работать в BLIP-режиме.

На рис. 6 приведены спектральные зависимости чувствительности КРТ-фотодетектора ($x \approx 0,3$). Измерения проводились с использованием монохроматора SPM-2 с призмой NaCl UV-56. Полученные значения нормировались на спектр излучения абсолютно черного тела. Из рисун-

ка следует, что изготовленные КРТ-структуры фоточувствительны и при повышенных температурах и соответствуют указанному спектральному диапазону.

Изготовлены фотодиоды на основе слоев $\text{HgCdTe}/\text{CdZnTe}$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии для средневолнового ИК диапазона спектра ($3-5$ мкм). Исследования оптических, электрических и фотоэлектрических характеристик разработанных ИК-фотодиодов на основе структур HgCdTe с диаметром чувствительных элементов $0,5-1,5$ мм показали, что в средневолновом диапазоне ($3-5$ мкм) эти устройства могут функционировать в режиме ограничения фоном (BLIP-режиме).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Michael Kinch. Fundamentals of Infrared Detector Materials. — Bellingham, Washington: SPIE Press, 2007.
2. Сизов Ф.Ф. Фотоэлектроника для систем видения. — Киев: Академперіодика, 2008.
3. MCT's Advantages as an Infrared Imaging Material. http://www.leonardodrs.com/media/4279/201306_advantages_of_mct.pdf
4. Capper P., Garland J. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications. — Wiley and Sons, 2011.
5. Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники. — Москва: Физматкнига, 2010.
6. Сизов Ф.Ф. ИК-фотоэлектроника: фотонные или тепловые детекторы? Перспективы // СЕМСТ. — 2015. — Т. 12, №1. — С. 26—52.
7. Wimmers J.T., Davis R.M., Niblack C.A., Smith D.S. Indium antimonide detector technology at Cincinnati Electronics Corporation // Proc. SPIE. — 1988. — Vol. 930. — P. 125—138.
8. Chu J., Sher A. Physics and properties of narrow-gap semiconductors. — Springer, N.Y., 2008.
9. Saxena R. S., Bhan R. K., Sharma R. K. Sensitivity analysis of MWIR HgCdTe photodiodes physics of semiconductor devices // International Workshop on Physics of Semiconductor Devices, IWPSD 2007. — <https://doi.org/10.1109/IWPSD.2007.4472557>
10. Sizov F., Tsybrii Z., Vuichyk M. et al. HgCdTe photodiodes for infrared mid-wavelength region // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. — 2016 — Vol. 13, N 1. — P. 49—55.
11. Сизов Ф.Ф., Забудский В.В., Голенков А.Г. и др. Методика измерения темновых токов полупроводниковых многоэлементных структур при криогенных температурах // Контрольно-измерительные приборы и автоматика. — 2007. — №1. — С. 4—7.

Дата поступления рукописи
в редакцию 09.11 2017 г.

К. ф.-м. н. З. Ф. ЦИБРИЙ, К. В. АНДРЕЄВА, М. В. АПАТСЬКА, С. Г. БУНЧУК,
к. ф.-м. н. М. В. ВУЙЧИК, к. ф.-м. н. О. Г. ГОЛЕНКОВ, Н. В. ДМИТРУК,
к. ф.-м. н. В. В. ЗАБУДСЬКИЙ, к. ф.-м. н. І. О. ЛИСЮК, к. ф.-м. н. К. В. СВЕЖЕНЦОВА,
М. І. СМОЛІЙ, член-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. Ф. Ф. СИЗОВ

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
E-mail: tsybrii@isp.kiev.ua

ДИСКРЕТНІ ФОТОПРИЙМАЧІ СЕРЕДНЬОГО ІЧ-ДІАПАЗОНУ СПЕКТРА НА ОСНОВІ HgCdTe

Розроблено топологію та технологічні режими виготовлення дискретних фотодіодів (діаметр 0,5–1,5 мм) для середнього інфрачервоного діапазону спектра на основі епітаксійних шарів кадмій-ртуть-телуриду (КРТ). Досліджено оптичні, фотоелектричні та вольт-амперні характеристики дискретних КРТ-фотодіодів для спектрального діапазону 3–5 мкм з метою досягнення необхідних експлуатаційних параметрів. Встановлено, що одержані фотодіоди можуть працювати в режимах, обмежених флуктуаціями фонового випромінювання (BLIP-режим).

Ключові слова: HgCdTe, фотодіод, ІЧ-діапазон, ВАХ.

DOI: 10.15222/TKEA2017.6.08
UDC 621.383.522

Z. F. TSYBRII, K. V. ANDREEVA, M. V. APATSKA,
S. G. BUNCHUK, M. V. VUICHYK, O. G. GOLENKOV,
N. V. DMYTRUK, V. V. ZABUDSKY, I. O. LYSIUK,
K. V. SVEZHENTSOVA, M. I. SMOLII, F. F. SIZOV

Ukraine, Kyiv, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine
E-mail: tsybrii@isp.kiev.ua

MEDIUM WAVELENGTH INFRARED HgCdTe DISCRETE PHOTODETECTORS

The authors have developed the topology and technological fabrication route for discrete photodiodes ($\varnothing = 0,5 - 1,5$ mm) for the mid wavelength infrared (MWIR) range, based on the mercury-cadmium-telluride (MCT) epitaxial layers. The paper describes technological processes of MCT photodiodes fabrication, including CdTe passivation layers growth, photolithographic processes for the formation of windows for B^+ implantation, formation of metallic coatings, chemical surface treatments, cutting of the wafer on the discrete chips, assembling and bonding of the electrical contacts. Optical, photoelectrical and current-voltage characteristics of discrete MCT photodiodes for the spectral range of 3–5 microns are investigated in order to achieve the necessary operational parameters. FTIR transmission spectra were measured to evaluate samples quality and find the composition of x of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ epitaxial layers grown by liquid phase epitaxy method. The limiting characteristics of photodiodes, which are determined by the magnitude of the detector current at the reverse bias and the product of the dynamic resistance at zero bias by the area of the photosensitive element R_0A_d at the operating temperature of 77 K were discussed. The requirement for the parameter R_0A_d was estimated for the operation of photodiodes of the mid wavelength infrared range in the BLIP (background limited performance) mode for the angles of view $\theta_i = 90^\circ$ and $\theta_i = 30^\circ$: $R_0A_d \geq 5 \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$. It was found from dynamical resistance characteristics that without bias in these MCT MWIR photodiodes $R_0A_d \approx (0,57 - 1,08) \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ and these photodiodes can operate in BLIP mode.

Keywords: HgCdTe, photodiode, IR region, I-V characteristic.

REFERENCES

1. Michael Kinch. *Fundamentals of Infrared Detector Materials*. Bellingham, Washington, SPIE Press, 2007, 173 p.
2. Sizov F.F. *Fotoelektronika dlya sistem videniya* [Photoelectronics for imaging systems]. Kyiv, Akademperiodyka, 2008, 455 p. (Rus)
3. *MCT's Advantages as an Infrared Imaging Material*. http://www.leonardodrs.com/media/4279/201306_advantages_of_mct.pdf
4. Peter Capper, James Garland. *Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications*. Wiley and Sons, 2011.
5. Filachev A.M., Taubkin I.I., Trishenkov M.A. *Sovremennoe sostoyanie i magistralnye napravleniya razvitiya tverdotelnoi fotoelektroniki*. [Current state and main directions of development of solid-state photoelectronics]. Moscow, Phizmatkniga, 2010, 125 p. (Rus).
6. Sizov F. IR-photoelectronics: photon or thermal detectors? Outlooks. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2015, vol. 12, iss. 1, pp. 26-52.
7. Wimmers J.T., Davis R.M., Niblack C.A., Smith D.S. Indium antimonide detector technology at Cincinnati Electronics Corporation. *Proc. SPIE*, 1988, vol. 930, pp.125-138.
8. Chu J., Sher A. *Physics and properties of narrow-gap semiconductors*. Springer, N.Y., 2008, 606 p.
9. Saxena R. S., Bhan R. K., Sharma R. K. Sensitivity analysis of MWIR HgCdTe photodiodes physics of semiconductor devices. *International Workshop on Physics of Semiconductor Devices*. <https://doi.org/10.1109/IWPSD.2007.4472557>
10. Sizov F., Tsybrii Z., Vuichyk M., Andreyeva K., Apatska M., Bunchuk S., Dmytruk N., Smolii M. HgCdTe photodiodes for infrared mid-wavelength region. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2016, vol. 13, no. 1, pp. 49-55.
11. Sizov F., Zabudsky V., Golenkov O., Andreeva K., Guzenko G.O., Lysiuk I. *KIPiA*, 2007, no. 1, pp. 4-7. (Rus).

К. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО¹, к. т. н. А. Г. ДУБКО^{1, 2},
д. т. н. В. М. СИДОРЕЦЬ², к. т. н. Ю. В. БОНДАРЕНКО¹

Україна, м. Київ, ¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; ²Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ
E-mail: bondarenkoaf@gmail.com, andreyes17@gmail.com,
sydornv@gmail.com, bondarenko.julie@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ ДИЛАТОМЕТРИЧНОГО ЕФЕКТУ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ

З метою покращення якості зварних з'єднань запропоновано використання дилатометричного ефекту для керування процесом контактного точкового зварювання, а саме переміщенням зварювальних електродів. Для його відстеження запропоновано застосування сучасних інерціальних MEMS-давачів. Розроблено експериментальну вимірювальну систему, яка обробляє сигнал MEMS-давачів і робить його придатним для використання як сигналу зворотного зв'язку. Проведено оцінку можливостей вимірювання мікропереміщень електродів, що спостерігаються в результаті дилатометричного ефекту при контактному зварюванні, за допомогою MEMS-давачів. Запропоновано використання цього способу і устаткування для зварювання як металів, так і живих м'яких тканин. Результати попередніх досліджень свідчать, що запропоновані рішення є доцільними і перспективними.

Ключові слова: контактне зварювання, теплове розширення матеріалу, дилатометричний ефект, керування, якість зварювання, живі тканини.

Контактне точкове зварювання знайшло широке застосування в електронній промисловості та приладобудуванні. Існує ряд випадків, коли переваги точкового зварювання незаперечні в порівнянні з паянням. Це, насамперед, екстремальні умови експлуатації електронних виробів, наприклад високий рівень радіації або дія короткочасних теплових та світлових імпульсів. Очевидно, що відповідальні зварні з'єднання повинні мати покращені показники якості, які можуть бути досягнуті через застосування автоматичного керування зварювальним процесом.

На сьогодні відомо багато способів автоматичного керування, що використовуються в контактному зварюванні, серед яких, в першу чергу, відзначимо керування зварювальним струмом [1, 2]. Формування переднього фронту зварювального імпульсу струму забезпечує бездефектність зварного з'єднання, тривалість амплітудного значення імпульсу струму визначає його необхідні розміри, а форма спаду імпульсу визначає термічний цикл, що є важливим для отримання необхідної мікроструктури металу зварної точки та зони термічного впливу [2]. Значний вплив на якість з'єднання має також зусилля, що прикладається до зварювальних електродів і викликає їх переміщення

[1–3]. Керування цим переміщенням спільно з керуванням струмом відкриває нові перспективи поліпшення якості з'єднань. При цьому залишається відкритим і актуальним питання реєстрації таких переміщень з метою задіяння відповідних сигналів у колах зворотного зв'язку.

Великий досвід Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона з контактного зварювання металів сприяв розробці технології з'єднання зварюванням м'яких живих тканин, яка сьогодні знайшла широке застосування в різних областях хірургії: загальній та абдомінальній хірургії, колопроктології, пластичній і косметичній хірургії, гінекології, мамології, урології, хірургії травм, судинній хірургії, онкології, оториноларингології, офтальмології [4–9]. В основі технології зварювання тканин лежать фізичні явища, подібні до тих, на яких ґрунтується контактне зварювання металів опором, тому така технологія не вимагає додаткових витратних матеріалів (ниток, металевих скоб, клею) [10, 11]. Процес зварювання м'яких живих тканин захищено патентами України [12–14] та закордонними патентами [15–17].

На **рис. 1** представлена схема контактного зварювання артерії. Між електродами 1 затискається артерія 2. До електродів прикладається зусилля стиснення F_c та напруга високої частоти $\sim U$. В результаті утворюється так звана колагенова кліпса. Основну роль в такому з'єднанні відіграє взаємодія колагенових структур [18].

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (ДБ № 0116U006924).

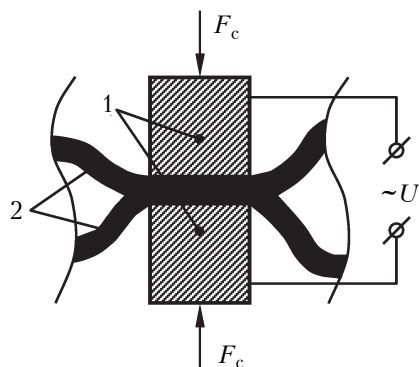


Рис. 1. Схема контактного зварювання артерії:
1 – електроди; 2 – стінки артерії

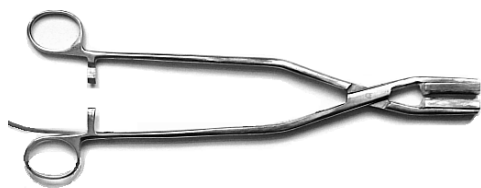


Рис. 2. Біполярні затискачі для зварювання судин

На **рис. 2** показані біполярні електрохірургічні затискачі для зварювання судин.

Враховуючи важливість сфери застосування технології, що розглядається, значна увага має бути приділена якості отримуваних в результаті зварювання з'єднань живих тканин. Відзначимо також, що високі показники міцності з'єднань в даному випадку не гарантують якість. Молекули білку, що коагулюють, не мають втрачати здатності до регенерації та відновлення в післяопераційний період. Тому дуже актуальною є задача ефективного контролю процесу формування з'єднань безпосередньо в ході проведення операції.

Для організації такого контролю може бути використаний дилатометричний ефект (збільшення лінійних розмірів і об'єму матеріалу при нагріванні під час зварювання), що дозволить знизити вплив людського фактору, а отже, підвищити якість проведення хірургічних операцій та знизити тривалість післяопераційної реабілітації пацієнтів.

Практична реалізація ідеї використання дилатометричного ефекту для керування зварюванням м'яких живих тканин може базуватись на організації замкненої системи автоматичного керування за таким параметром як мікропереміщення рухомого електрода в результаті зміни розмірів металевих деталей або біологічних тканин в процесі зварювання. В цьому контексті стає актуальною проблема вимірювання мікропереміщень з високою точністю і за дуже малі проміжки

часу. Перспективним для вирішення цієї задачі видається застосування сучасних мікроелектромеханічних давачів (**MEMS**), що мають високу точність та швидкодію.

Метою даної роботи є оцінка можливостей вимірювання переміщень зварювальних електродів, спричинених дилатометричним ефектом, за допомогою MEMS-давачів і виявлення перспектив застосування отриманих в такий спосіб сигналів переміщення для керування процесом контактного зварювання як металевих виробів, так і м'яких живих тканин.

Використання дилатометричного ефекту для керування процесом контактного зварювання

Відомо [3], що за температурою T твердого тіла його довжина l_T та об'єм V_T обчислюються як

$$l_T = l_0(1 + \alpha_l T), \quad (1)$$

$$V_T = V_0(1 + \beta_V T), \quad (2)$$

де l_0 , V_0 – довжина і об'єм тіла за початкової температури $T_0 = 0^\circ\text{C}$;

α_l , β_V – термічні коефіцієнти лінійного і об'ємного розширення [16].

В процесі точкового контактного зварювання переміщення електрода відбувається під дією зовнішньої сили, якій протидіє теплове розширення металу, що пов'язано зі зростанням розмірів литої зони зварного з'єднання [1, 3, 19]. Відносна зміна об'єму при нагріванні деяких металів ($\Delta V = V_T/V_0 - 1$) представлена графіками на **рис. 3**. При контактному зварюванні живих тканин протидія обумовлена зміною пружності колагену при його нагріванні. Треба відзначити, що пружність колагену змінюється, доки біологічна тканина залишається живою, тобто такою, що не втратила здатність відновлювати свою функціональність в подальшому.

На **рис. 4** показано переміщення рухомого електрода від теплового розширення. При цьому зусилля стиснення F_c зрівноважується реакцією внутрішньої консолі F_p , а внутрішні сили F_v прагнуть розсунути електроди на величину $\Delta h_{\text{ел}}$ [3].

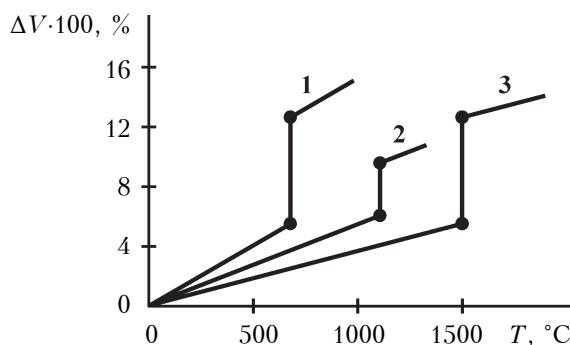


Рис. 3. Відносна зміна об'єму при нагріванні алюмінію (1), міді (2) та сталі (3) [3]

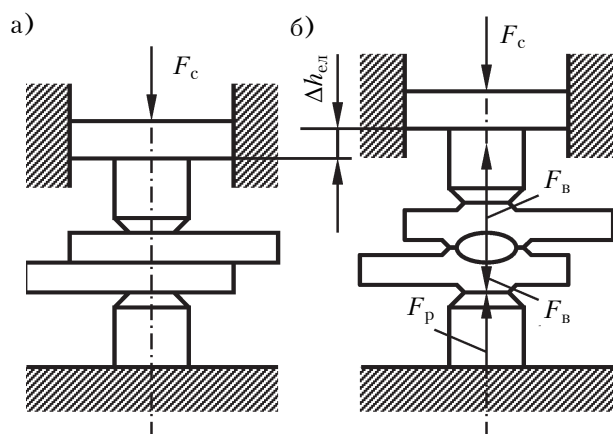


Рис. 4. Переміщення рухомого електроду до дії теплового розширення (а) та після неї (б) на прикладі контактної зварювання металу [3]

В умовах точкового зварювання збільшення товщини та об'єму деталей відбувається переважно в напрямку вертикальної осі, оскільки розширення в напрямку горизонтальної осі стримується більш холодною масою сусідніх ділянок [3].

Теплове розширення Δ_p металу при зварюванні викликає переміщення (розсування) електродів машини, в основному — верхнього рухомого електроду. Однак виміряні значення $\Delta h_{ел}$ значно менші за розрахункові Δ_p (рис. 5, а) внаслідок вдавлення електродів (Δ_B) в матеріал, тобто

$$\Delta h_{ел} = \Delta_p - \Delta_B. \quad (3)$$

Великі значення $\Delta h_{ел}$ реєструються при зварюванні металів з великим опором деформації, при використанні жорстких режимів зварювання і машин з великою жорсткістю нижнього електроду та малими силами тертя в приводі рухомого електроду.

Помітне переміщення верхнього електроду спостерігається з моменту розплавлення металу (появи ядра) і далі відбувається у відповідності зі змінами температурного поля і зростанням розмірів ядра. Максимальні значення $\Delta h_{ел}$ зазвичай відповідають моменту вимикання струму при зварюванні уніполярним струмом (рис. 5, а) [3].

Зв'язок переміщення $\Delta h_{ел}$ зі змінами температурного поля наочно спостерігається при зварюванні тонких деталей машиною змінного струму з великими кутами керування тиристорів (рис. 5, б), коли переміщення електроду відбувається поривчасто, відповідно до імпульсів струму і зміни температурного поля. Глибина переміщень електроду залежить від теплопровідності, термічних коефіцієнтів лінійного і об'ємного розширення, теплоємності

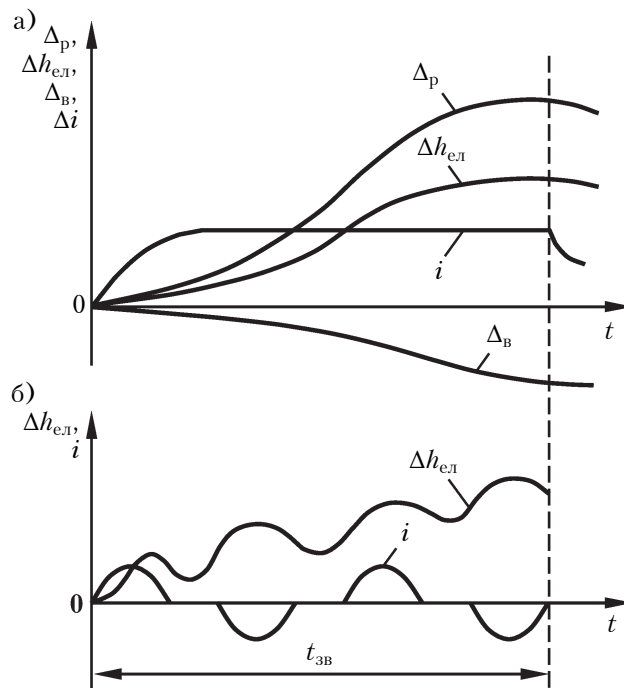


Рис. 5. Характер теплового розширення металу Δ_p , переміщення електроду $\Delta h_{ел}$ і пластичної деформації (глибини вм'ятини Δ_B) впродовж зварювального циклу $t_{зв}$ імпульсом постійного струму (а) і змінним струмом (б) [3]

і прихованої теплоти плавлення зварюваного матеріалу.

Переміщення рухомого електроду внаслідок дилатометричного ефекту є узагальнюючим параметром, пов'язаним з якістю точкового контактної зварювання металів. Між величиною переміщення електроду і об'ємом розплавленого металу існує прямий взаємозв'язок. Відомо, що збільшення лінійного розміру деталей при зварюванні становить 8–10% від їх сумарної товщини [1, 3]. Таким чином, переміщення електроду може ефективно використовуватись для неруйнівного контролю розмірів литого ядра. Організація системи автоматичного керування за цим параметром дозволить забезпечити задану якість зварювання.

Розглянемо відомий варіант побудови установки для зварювання металів з системою автоматичного керування за параметром переміщення електродів [1].

Вимірювання переміщення електродів за допомогою індуктивних датчиків

На рис. 6 схематично показана установка контактної зварювання з датчиком переміщення електродів. Розширення деталей викликає переміщення електродотримача разом з верхньою рухомою частиною зварювальної машини. Величина цього переміщення вимірюється датчиком, який жорстко зв'язаний з нерухомою ча-

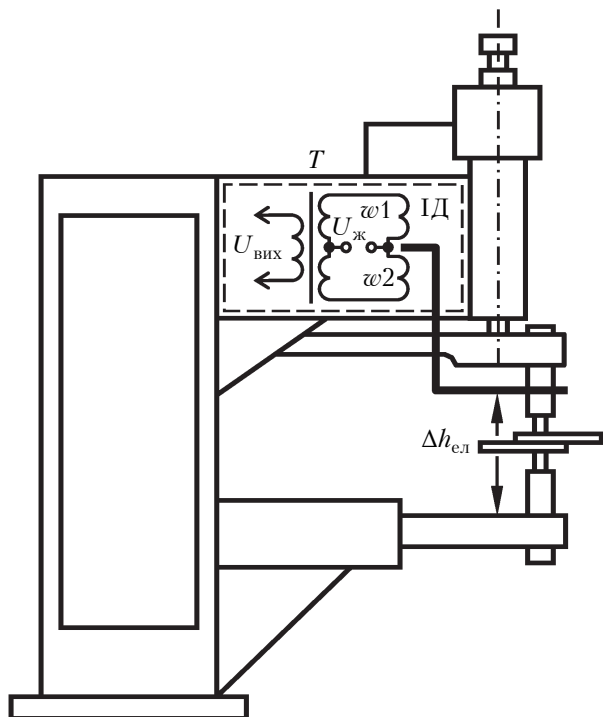


Рис. 6. Установка контактного зварювання з індуктивним датчиком переміщення електродів

стиною зварювальної машини. Рухомий елемент давача зв'язаний з електродотримачем.

У найпростішому випадку використовуються контактні електромеханічні давачі, що спрацьовують при переміщенні електрода на встановлену величину. Для побудови систем автоматичного керування застосовують індуктивні давачі, які здатні вимірювати малі переміщення (рис. 6). Індуктивний давач (ІД) складається з двох котушок w_1 і w_2 , встановлених на магнітопроводах, жорстко пов'язаних з нерухомою частиною зварювальної машини. Котушки послідовно включені з обмотками диференціального трансформатора Т.

У повітряному проміжку магнітопроводів розташовано якір, механічно пов'язаний з верхнім рухомим електродотримачем. В процесі зварювання електродотримач під дією сил теплового розширення переміщується вгору на величину $\Delta h_{\text{ел}}$ і змінює індуктивний опір обмоток w_1 і w_2 . На виході трансформатора Т з'являється сигнал неузгодженості, пропорційний $\Delta h_{\text{ел}}$, який використовується в системі автоматичного керування для контролю часу протікання зварювального струму.

В деяких випадках представляє інтерес вимірювання не тільки переміщення $\Delta h_{\text{ел}}$, але й швидкості його зміни dh/dt , оскільки ця величина характеризує швидкість нагрівання та охолодження, тобто термічний цикл зварювання, яким визначається структура металу ядра, а отже, і якість зварного з'єднання.

Для вимірювання швидкості зміни переміщення вихідний сигнал мостової вимірювальної системи диференціюється і надсилається до вузла порівняння. Якщо під дією збурень швидкість нагрівання виходить за встановлені межі, сигнал неузгодженості змінює величину зварювального струму таким чином, щоб зменшення сигналу dh/dt відповідало збільшенню струму, і навпаки. Коли величина переміщення $\Delta h_{\text{ел}}$ досягає заданого значення, що відповідає оптимальному розміру ядра зварної точки, система автоматичного керування вимикає струм [1].

Описана система показала свою ефективність при контактному зварюванні металів, проте використання такого підходу для організації керування процесом зварювання живих м'яких тканин неможливе через такі принципові складнощі, як недостатня точність та швидкодія індуктивних давачів, а також неприпустима для хірургії громіздкість системи на їх основі.

Вимірювання переміщення електродів за допомогою MEMS-давачів

В теперішній час для реєстрації руху об'єкта все ширше використовують MEMS-давачі. За допомогою MEMS-гіроскопів вимірюють кутові швидкості, за допомогою MEMS-акселерометрів — прискорення.

Загальною конструктивною ознакою MEMS є використання в них різних за конфігурацією двоступеневих пружних підвісів чутливого елемента (ЧЕ). Принцип роботи MEMS полягає у створенні відносно корпусу знакозмінного поступального або обертального руху ЧЕ за одним зі ступенів свободи та у вимірюванні переміщень за іншим ступенем свободи, що виникають під дією коріолісових сил або гіроскопічних моментів за наявності переносної кутової швидкості корпусу. На рис. 7 цей принцип пояснюється на прикладі MEMS з двоступеневим пружним підвісом і поступальним

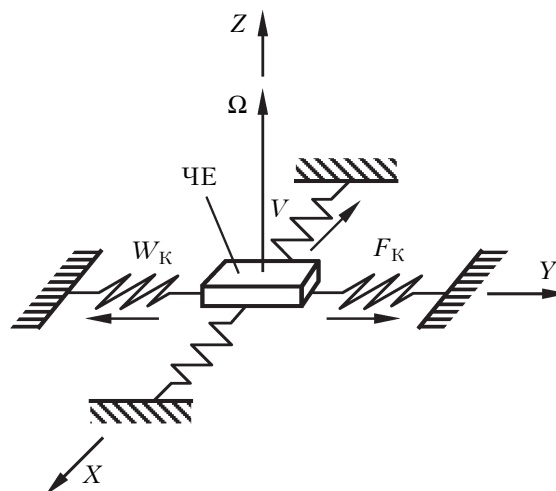


Рис. 7. Принцип дії MEMS-гіроскопа

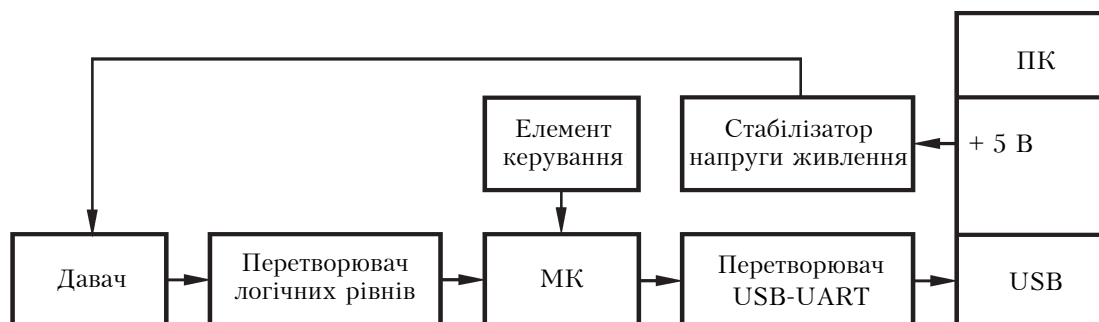


Рис. 8. Структура системи вимірювання мікропереміщень на основі MEMS-давача

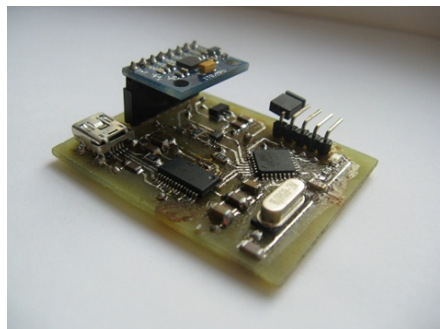


Рис. 9. Зовнішній вигляд розробленого експериментального пристрою

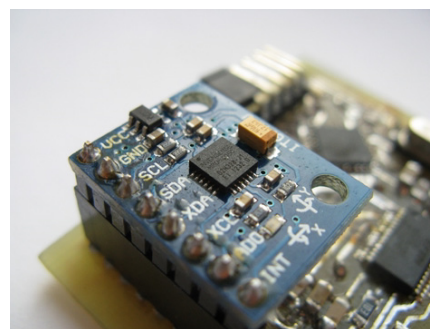


Рис. 10. Зовнішній вигляд плати давача MPU-6050

переміщенням ЧЕ. За наявності знакозмінної відносної лінійної швидкості V вздовж осі OX і переносної вимірюваної кутової швидкості Ω навколо осі OZ з'являється знакозмінне прискорення Коріоліса W_K і відповідна йому сила F_K уздовж осі OY .

Апаратна частина експериментальної вимірювальної системи

Для оцінки можливостей керування процесом контактного зварювання металів та м'яких живих тканин шляхом контролю дилатометричного ефекту за допомогою MEMS-давачів розроблено експериментальну вимірювальну систему, апаратна частина якої включає наступні елементи:

- давач з шістьма ступенями свободи (тривісний гіроскоп і тривісний акселерометр);
- мікроконтролер (МК);
- перетворювач логічних рівнів інформаційної шини між давачем та МК;
- елемент керування;
- персональний комп'ютер (ПК);
- перетворювач інтерфейсів USB-UART;
- стабілізатор напруги для живлення інерційного давача.

Структурну схему системи наведено на **рис. 8**. Давач містить у собі тривісний акселерометр і тривісний гіроскоп. Через цифровий інтерфейс дані з давача надходять до МК для подальшої обробки. Після цього сигнал передається до ПК через цифровий інтерфейс. Живлення схеми здійснюється з ПК. Для забезпечення функціонування давача необхідними є

стабілізатор напруги та перетворювач логічних рівнів на шині даних. Елемент керування призначений для запуску або призупинення роботи давача.

Зовнішній вигляд розробленого експериментального пристрою наведено на **рис. 9**. Плата використаного в розробці давача MPU-6050 [20] показана на **рис. 10**, а його параметри зведені в **таблиці**.

Параметри давача MPU-6050 [20]

Параметр	Значення
Кількість осей акселерометра	3 (X, Y, Z)
Діапазон прискорень, $\pm g$	2 – 16
Кількість осей гіроскопа	3 (X, Y, Z)
Діапазон кутових швидкостей, $^{\circ}/c$	250 – 2000
Робочий діапазон температур	$-40...+85^{\circ}C$

Програмна частина експериментальної вимірювальної системи

Програмну частину пристрою розроблено для мікроконтролера. Вона відповідає за зчитування даних з інерційного MEMS-давача MPU-6050 та їх передачу до ПК для подальшої обробки.

Блок-схема алгоритму роботи розробленого програмного забезпечення наведена на **рис. 11**. Програма працює наступним чином. Після подачі живлення на пристрій відбувається ініціалізація портів введення-виведення МК (налаштування портів на роботу як входних або як вихідних). Наступним кроком відбувається на-

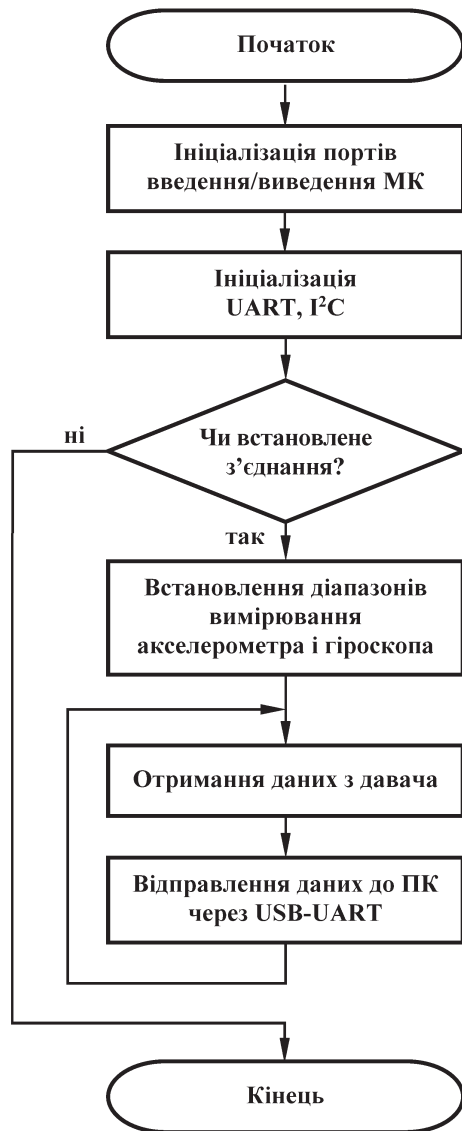


Рис. 11. Алгоритм роботи пристрою для вимірювання мікропереміщень

лаштування послідовних інтерфейсів передачі даних UART та I2C і встановлення з'єднання з датчиком MPU-6050. Про стан з'єднання (вдале чи ні) до ПК відправляється відповідне повідомлення. Далі відбувається налаштування діапазонів вимірювання гіроскопа та акселерометра. Після цього з кожної осі акселерометра та гіроскопа в однакові моменти часу циклічно отримуються дані, які надсилаються до персонального комп'ютера.

Слід відзначити, що для інерційного MEMS-датчика MPU-6050 існують готові бібліотеки, завдяки чому полегшується його програмування.

Дослідження характеристик розробленої системи

В процесі досліджень була проведена оцінка можливості застосування MEMS-датчиків для контролю дилатометричного ефекту при удосконаленні процесу з'єднання контактним

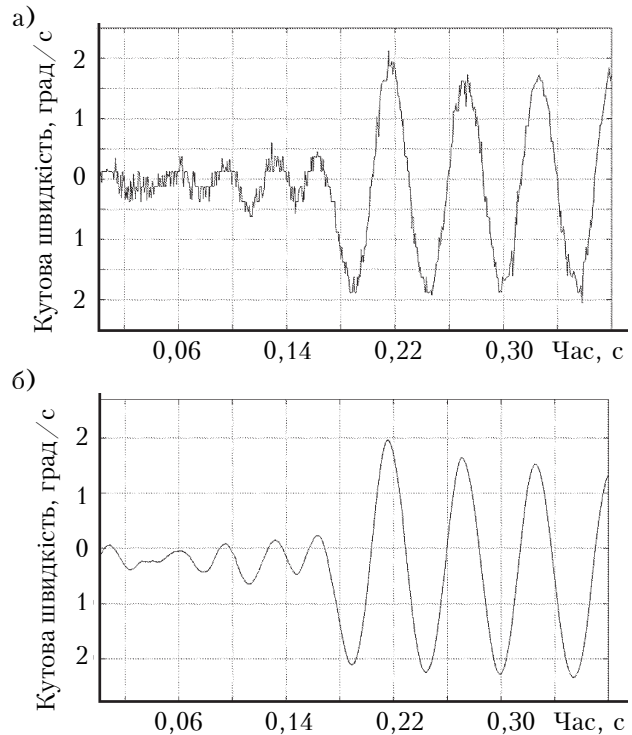


Рис. 12. Діаграми кутової швидкості в часі

зварюванням. При цьому як датчики використовувалися акселерометр типу MMA7260Q, гіроскоп типу MLX90609, а також мікросхема, яка поєднує функції акселерометра і гіроскопа — MPU-6050.

На рис. 12 наведено часові діаграми кутової швидкості. Діаграма, отримана за допомогою гіроскопа, представлена за результатами вимірювання безпосередньо з датчика (рис. 12, а), а діаграма, отримана за допомогою акселерометра, представлена за результатами вимірювання прискорення з подальшим інтегруванням і відповідними перетвореннями (рис. 12, б).

Величини переміщень, які вдалося зареєструвати, знаходяться в діапазоні від одиниць мікрметрів (мінімум 5 мкм) до одиниць міліметрів. При цьому швидкість передачі даних системи дорівнює 1 мс. Слід відзначити, що ці величини відповідають параметрам переміщень, характерним для дилатометричного ефекту, що спостерігається в процесі зварювання (десятки мікрон за одиниці мілісекунд).

Окремо слід також відзначити мініатюрні габарити MEMS-датчиків. Розміри мікросхеми датчика складають приблизно 5×5 мм, а розміри плати, на якій встановлено мікросхему, дорівнюють 32×38 мм. Мініатюрність датчиків є важливою для забезпечення компактності електрохірургічного інструменту та устаткування.

Висновки

Дослідження показників точності і швидкодії розробленого експериментального вимі-

рювального пристрою на основі MEMS-давачів довело його спроможність реєструвати значення переміщень зварювальних електродів, спричинених дилатометричним ефектом, характерні для контактного зварювання як металевих виробів, так і живих м'яких тканин.

Таким чином, побудову систем автоматичного керування за параметром переміщення на основі використання дилатометричного ефекту та MEMS-давачів можна вважати доцільною і перспективною, а застосування таких систем можна рекомендувати для вдосконалення машин контактної зварювання металів та електрохірургічного обладнання.

Для впровадження запропонованого підходу в хірургічну практику необхідна експериментальна перевірка і підтвердження отриманих результатів шляхом застосування контактної зварювання до різних типів біологічних тканин тварин і людини.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Автоматизация сварочных процессов / Под ред. В.К. Лебедева, В.П. Черныша. – Киев: Вища шк., Гол. изд-во, 1986.
2. Bondarenko, O.F., Bondarenko I.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). – Ljubljana, Slovenia. – 2013. – P. 298–303. – <https://doi.org/10.1109/CPE.2013.6601173>.
3. Орлов Б.Д., Чакалев А.А., Дмитриев Ю.В. и др. Технология и оборудование контактной сварки: Учебник для машиностр. вузов. – Москва: Машиностроение, 1986.
4. Paton B.E. Electric welding of soft tissues in surgery // The Paton Welding Journal. – 2004. – N 9. – P. 6–10.
5. Paton B.E. Welding and related technologies for medical application // The Paton Welding Journal. – 2008. – N 11. – P. 11–19.
6. Тканесохраняющая высокочастотная электросварочная хирургия. Атлас / Под ред. Б.Е. Патона, О.Н. Ивановой. – Киев: Наукова думка, 2009.
7. Sydorets V., Lebedev A., Dubko A. Mathematical modeling of the current density distribution in a high-frequency

electrosurgery // 16th Int. Conf. on Computational Problems of Electrical Engineering. – Lviv, Ukraine. – 2015. – P. 215–217. – <https://doi.org/10.1109/CPEE.2015.7333379>.

8. Linchevskyy O., Makarov A., Getman V. Lung sealing using the tissue-welding technology in spontaneous pneumothorax // European Journal of Cardio-thoracic Surgery. – 2010. – N 5. – P. 1126–1128.

9. Umanets, N.N., Pasyechnikova N.V., Naumenko V.A., Henrich P.B. High-frequency electric welding: a novel method for improved immediate chorioretinal adhesion in vitreoretinal surgery // Graefes' Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology. – 2014. – N 11. – P. 1697–1703.

10. Лебедев В.К., Лебедев А.В., Буштетт Ю.П. та ін. Применение сварки в хирургии // Сварочное производство. – 2008. – № 11. – С. 23–25.

11. Лебедев А.В., Дубко А.Г. Особенности применения теории контактной сварки металлов к сварке живых тканей // Технічна електродинаміка. – 2012. – Вип. 2. – С. 187–192.

12. Пат. 39907 України. Спосіб з'єднання судин та інших порожнистих органів тварин або людини й пристрій для його здійснення / Б.Є. Патон, В.К. Лебедев, Д. С. Ворона та ін. – 2001. – Бюл. № 6.

13. Пат. 44805 України. Спосіб з'єднання м'яких біологічних тканин і улаштування для його здійснення / Б.Є. Патон, В.К. Лебедев, Д.С. Ворона та ін. – 2002. – Бюл. № 3.

14. Пат. 74881 Україна. Спосіб з'єднання м'яких біологічних тканин і улаштування для його здійснення / Б.Є. Патон, В.К. Лебедев, О.М. Иванова та ін. – 2006. – Бюл. № 2.

15. Pat. 2002/0091385 USA. Bonding of soft biological tissues by passing high frequency electric current therethrough / V.K. Lebedev et al. – 11.07.2002.

16. Pat. 6733498 USA. System and method for control of tissue welding / B.E. Paton et al. – 21.08.2003.

17. Пат. 2294171 России. Способ сварки мягких тканей животного и человека / Б.Е. Патон и др. – 27.02.2007.

18. Патон Б.Є., Булавин Л.А., Актан О.Ю. та ін. Структурні перетворення колагену при електрозварюванні м'яких живих тканин // Доповіді Національної академії наук України. – 2010. – № 2. – С. 94–101.

19. Козловский С.Н. О выборе параметров дилатометрического контроля и регулировании процесса точечной сварки // Сварочное производство. – 1991. – № 9. – С. 27–31.

20. MPU-6050 Six-Axis (Gyro + Accelerometer) MEMS MotionTracking™ Devices [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>. – Назва з екрану.

Дата надходження рукопису
до редакції 27.03 2017 р.

К. т. н. А. Ф. БОНДАРЕНКО¹, к. т. н. А. Г. ДУБКО^{1, 2},
д. т. н. В. Н. СИДОРЦЬ², к. т. н. Ю. В. БОНДАРЕНКО¹

Україна, г. Київ, ¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського»,
²Інститут електросварки ім. Е. А. Патона НАНУ

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com, andreyies17@gmail.com,
sydorvn@gmail.com, bondarenko.julie@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

С целью улучшения качества сварных соединений предложено использовать дилатометрический эффект для управления процессом контактной точечной сварки, а именно перемещением сварочных электродов. Для его отслеживания предлагается применять современные инерциальные MEMS-датчики. Разработана экспериментальная измерительная система, которая обрабатывает сигнал MEMS-датчиков и делает его пригодным для использования в качестве сигнала обратной связи. Проведена оценка возможностей измерения микроперемещений электродов, наблюдаемых в результате дилатометрического эффекта при контактной сварке, с помощью MEMS-датчиков. Предложено использовать данный способ и оборудование как для сваривания металлов, так и живых мягких тканей. Результаты предварительных исследований показали, что предложенные решения являются целесообразными и перспективными.

Ключевые слова: контактная сварка, тепловое расширение материала, дилатометрический эффект, управление, качество сварки, живые ткани.

APPLYING OF DILATOMETRIC EFFECT FOR RESISTANCE WELDING
AUTOMATION

The important issue of resistance spot welding control to obtain high quality welded joints, especially in living tissue welding, is considered. The actual state of the issue is described and analyzed. In order to improve the quality of welded joints, the applying of dilatometric effect to control the resistance spot welding process, namely of shifting the welding electrodes, is suggested. To register the shifting, the use of modern inertial microelectromechanical sensors (MEMS) is proposed. The experimental measuring system, which processes the MEMS-sensor signal and makes it suitable for use as a feedback signal, is developed. The structure and operational algorithm of the system are described. The abilities of measuring with MEMS-sensors the values of electrode shifting caused by dilatometric effect under resistance welding are assessed. These method and equipment are recommended for welding the metals, as well as for welding the living tissues. The results of preliminary studies prove the advisability and relevance of the suggested solutions.

Keywords: resistance welding; thermal expansion of material; dilatometric effect; control; welding quality; living tissue.

REFERENCES

1. *Avtomatizatsiya svarochnykh protsessov* [Automation of welding processes] // Ed. by V.K. Lebedev, V.P. Chernysh. Kyiv: Vyshcha shk., Golovnoye izd-vo, 1986, 296 p. (Rus)
2. Bondarenko O.F., Bondarenko I.V., Safronov P.S., Sydorets V.M. Current and Force Control in Micro Resistance Welding Machines. Review and Development // *8th IEEE International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, Slovenia, Ljubljana, 2013, pp. 298–303. doi:10.1109/CPE.2013.6601173.
3. Orlov B.D., Chakalev A.A., Dmitriyev Yu.V. et al. *Tekhnologiya i oborudovaniye kontaktnoy svarki* [Technology and equipment for resistance welding]: *Textbook for machine-building universities*. Moscow, Mashinostroyeniye, 1986, 352 p. (Rus)
4. Paton B.E. Electric welding of soft tissues in surgery. *The Paton Welding Journal*, 2004, no 9, pp. 6–10.
5. Paton B.E. Welding and related technologies for medical application. *The Paton Welding Journal*, 2008, no 11, pp. 11–19.
6. *Tkanesokhranyayushchaya vysokochastotnaya elektrosvarochnaya khirurgiya. Atlas* [Tissue-preserving high-frequency electric welding surgery. Atlas]. Ed. by B.E. Paton, O.N. Ivanova. Kyiv, Naukova dumka, 2009, 199 p. (Rus)
7. Sydorets V., Lebedev A., Dubko A. Mathematical Modeling of the Current Density Distribution in a High-Frequency Electrosurgery. *16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. Ukraine, Lviv, 2015, pp. 215–217. doi: 10.1109/CPEE.2015.7333379.
8. Linchetsky O., Makarov A., Getman V. Lung sealing using the tissue-welding technology in spontaneous pneumothorax. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 2010, no 5, pp. 1126–1128.
9. Umanets N.N., Pasychnikova N.V., Naumenko V.A., Henrich P. B. High-frequency electric welding: a novel method for improved immediate chorioretinal adhesion in vitreoretinal surgery. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 2014, no 11, pp. 1697–1703.
10. Lebedev V.K., Lebedev A.V., Bushtedt Yu.P., Dubko A.H., Shelest N.A., Vasilchenko V.A., Sidorenko D.F., Sazonov V.Ya., Masalov D.V. Primeneniye svarki v khirurgii [The use of welding in surgery]. *Svarochnoye proizvodstvo*, 2008, no 11, pp. 23–25. (Rus)
11. Lebedev A.V., Dubko A.H. Osobennosti primeneniya teorii kontaktnoy svarki metallov k svarke zhivykh tkaney [Features of applying of the theory of resistance welding of metals for the welding of living tissues]. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2012, Iss. 2, pp. 187–192. (Rus)
12. Pat. 39907 Ukraine. *Sposib ziednannia sudyn ta inshykh porozhnistykh orhaniv tvaryn abo liudyny y prystrii dlia yoho zdiisnennia* [The method of bonding the vessels and other hollow bodies of animals or humans and a device for its implementation]. B.E. Paton, V.K. Lebedev, D.S. Vorona, V.I. Karchemskyi, Yu.O. Furmanov, O.V. Lebedev, V.A. Vasylichenko, D.F. Sydorenko, V.P. Yemchenko-Rybko, O.M. Ivanova, O.Yu. Furmanov, Ye.V. Zhyvodernikov, A.O. Lyashenko, I.M. Savitska, 16.07.2001. (Rus)
13. Pat. 44805 Ukraine. *Sposib ziednannia miakyykh biolohichnykh tkanyn i ulashtuvannia dlia yoho zdiisnennia* [The method of bonding the soft biological tissues and equipment for its implementation]. B.E. Paton, V.K. Lebedev, D.S. Vorona, V.I. Karchemskyi, Yu.O. Furmanov, O.V. Lebedev, V.A. Vasylichenko, D.F. Sydorenko, V.P. Yemchenko-Rybko, O.M. Ivanova, O.Yu. Furmanov, Ye.V. Zhyvodernikov, A.O. Lyashenko, 15.03.2002. (Rus)
14. Pat. 74881 Ukraine. *Sposib ziednannia miakyykh biolohichnykh tkanyn i ulashtuvannia dlia yoho zdiisnennia* [The method of bonding the soft biological tissues and equipment for its implementation]. B.E. Paton, V.K. Lebedev, O.M. Ivanova, N.A. Chvertko, Bushtedt Yu.P., M.A. Shelest, O.V. Lebedev, 15.02.2006. (Ukr)
15. Pat. 2002/0091385 A1 US. *Bonding of soft biological tissues by passing high frequency electric current therethrough*. Lebedev, A.V. Lebedev, D.S. Vorona, V.I. Karchemskyi, Y.A. Furmanov, V.A. Vasilchenko, D.F. Sidorenko, V.P. Yemchenko-Rybko, O.N. Ivanova, Y.V. Zhyvodernikov, A.A. Lyashenko, I.M. Savitskaya, Publ. Jul. 11, 2002.
16. Pat. 6733498 US. *System and method for control of tissue welding*. B.E. Paton, V.K. Lebedev, A.V. Lebedev, Y.A. Masalov, O.N. Ivanova, M.P. Zakharash, Y.A. Furmanov, Prior. 19.02.2002; Publ. Aug. 21.2003.
17. Pat. 2294171 Russia. *Sposob svarki miahkikh tkanei zhivotnoho i cheloveka* [The method of welding of soft tissue of animals and humans]. B.E. Paton, V.K. Lebedev, A.V. Lebedev, Y.A. Masalov, O.N. Ivanova, M.P. Zakharash, Y.A. Furmanov, Prior. 19.06.02; Publ. 27.02.07. (Rus)
18. Paton B.E., Bulavyn L.A., Aktan O.Yu., Zabashta Yu.F., Lebediev O.V., Podpriatov S.Ye., Dubko A.H., Ivanova O.M. *Strukturni peretvorennia kolahenu pry elektrozvariiuvanni miakyykh zhyvykh tkanyn* [Structural collagen transformations in electric welding of soft living tissues] // *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, 2010, no 2, pp. 94–101. (Rus)
19. Kozlovskiy S.N. O vybere parametrov dilatometricheskogo kontrolya i rehulirovaniy protsessu tochechnoy svarki [About the choice of parameters of dilatometric control and regulation of spot welding process]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1991, no 9, pp. 27–31. (Rus)
20. MPU-6050 Six-Axis (Gyro + Accelerometer) MEMS MotionTracking™ Devices [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>. – Title from the screen.

К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, О. И. ЕФИМОВ,
В. В. ПУНЬКО, С. Ю. ПАРОВОЙ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: koa@onu.ua

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ СХЕМА КАДРОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ С QPSK-МОДУЛЯЦИЕЙ

Предложена схема кадровой синхронизации для QPSK-модуляции на основе бинарных последовательностей четной длины с идеальной автокорреляционной функцией. Аналитически найдены все бинарные синхропоследовательности длиной $N=8$ со свойством идеальности автокорреляционной функции. На основе построенного спектра кодовых расстояний в метрике Хемминга для таких последовательностей было установлено, что они обладают корректирующей способностью, позволяющей исправлять однократные ошибки. На основе структурных свойств бинарных последовательностей длиной $N=8$ могут быть синтезированы последовательности большей кратной длины — 16, 32 и более.

Ключевые слова: непериодическая автокорреляционная функция, QPSK, QAM, кадровая синхронизация.

Обеспечение высокой помехоустойчивости и надежности работы схемы кадровой синхронизации в системах передачи информации с использованием многопозиционной модуляции, такой как QPSK (quadrature phase shift keying — квадратурная четырехпозиционная фазовая модуляция) или QAM_m (quadrature amplitude modulation — квадратурная амплитудная модуляция), тесно связано с применением сигнально-кодовых конструкций с хорошими непериодическими автокорреляционными свойствами [1–3].

Целью настоящей работы является разработка эффективной системы кадровой синхронизации для систем связи с квадратурной модуляцией на основе бинарных сигнально-кодовых последовательностей с идеальной секционированной непериодической автокорреляционной функцией.

Наиболее простыми с точки зрения декодирования являются бинарные последовательности с хорошими корреляционными свойствами [4], такие как коды Баркера, M -последовательности и т. д. При этом предполагается, что декодер синхропоследовательности установлен по видеочастоте, т. е. после демодулятора.

В системах связи с квадратурной модуляцией [5–8] передаваемый фрагмент данных представляет собой кадр, в состав которого могут входить следующие блоки:

- синхронизирующая последовательность либо синхросимвол для восстановления несущей (калибровка опорных частот для получения сигнальных созвездий);

- синхронизирующая последовательность для обеспечения кадровой синхронизации;

- информационный поток данных;

- признак конца кадра.

Длина самого кадра (фрейма) и, соответственно, длина синхронизирующей последовательности (в битах) могут быть произвольными четными величинами, кратными $\log_2 m$, где m — размерность QAM.

Известно, что бинарные последовательности длиной $N > 4$ не способны обеспечить идеальный вид непериодической автокорреляционной функции (**НАКФ**), определяемой выражением

$$R(k) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{m=0}^k S(k)h(m-k) = \begin{cases} N^2 & \text{при } k = N-1; \\ 0 & \text{при } k \neq N-1. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $S(k)$ — бинарный код длиной N ; $k = 0, \dots, N-1$; h — импульсная характеристика фильтра.

На **рис. 1** представлены НАКФ для кода Баркера $N=13$ и бинарной последовательности четной длины $N=16$ с минимальным уровнем боковых лепестков $R_{b\max}$ (**УБЛ**).

Из **рис. 1** видно, что у НАКФ бинарной последовательности четной длины $N=16$ УБЛ равен двум. Согласно данным, приведенным в [9], УБЛ растет с увеличением длины последовательности так, как показано в **табл. 1**.

Однако, поскольку каждая сигнальная точка созвездия QAM_m переносит $i = \log_2 m$ битов информации, появляется возможность корреляционного анализа с использованием «быстрой» свертки

$$R(k) = \sum_{k=i-1}^{\frac{2N-2}{i}-1} \sum_{m=0}^k S(ik)S(m-ik). \quad (2)$$

Зависимость УБЛ НАКФ от длины последовательности

Длина последовательности	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
Минимальный УБЛ НАКФ	1	2	3	2	2	2	2	2	3	3	3	3
Длина последовательности	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
Минимальный УБЛ НАКФ	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6

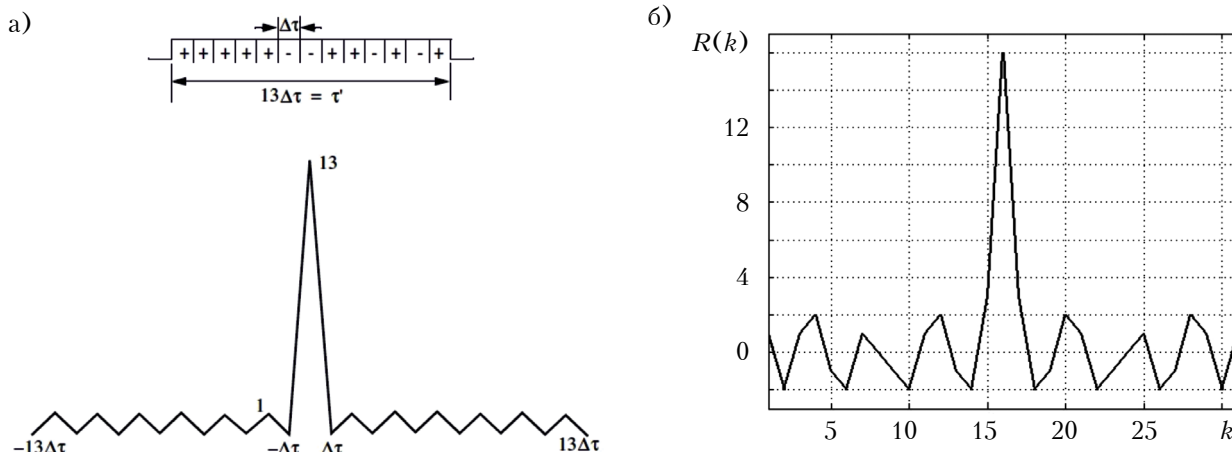
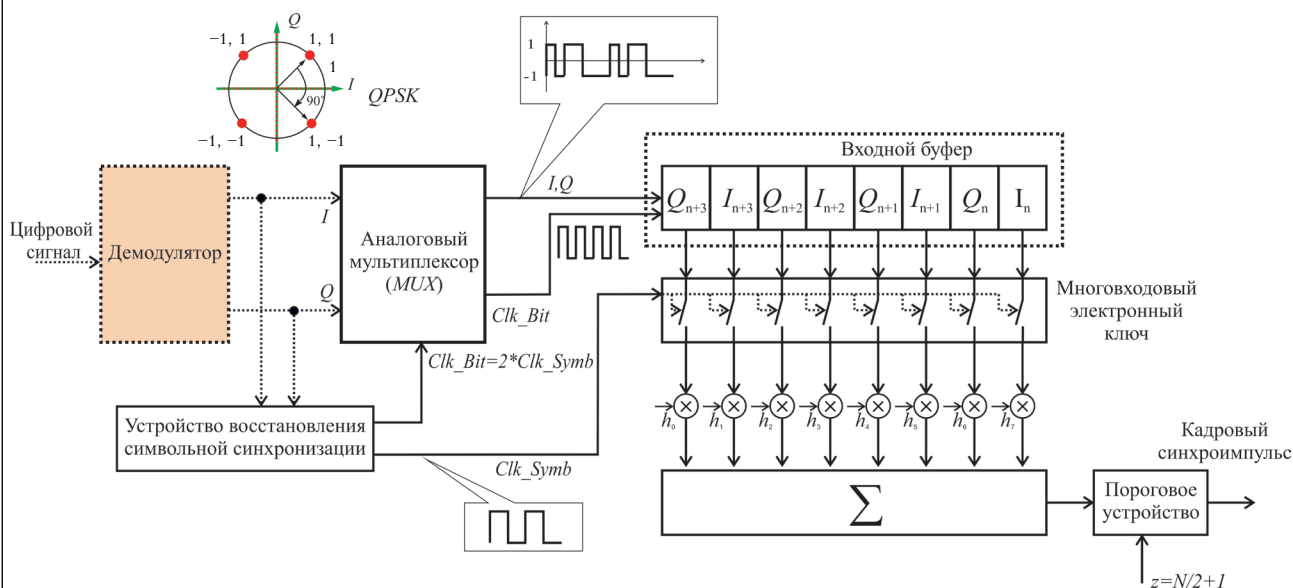
Рис. 1. НАКФ для кода Баркера $N=13$ (а) и для наилучшей бинарной последовательности четной длины $N=16$ по критерию минимума боковых лепестков (б)

Рис. 2. Схема восстановления кадровой синхронизации для QPSK

В случае QPSK формула (2) примет вид

$$R(k) = \sum_{k=1}^{N-2} \sum_{m=0}^k S(2k) \cdot S(m-2k). \quad (3)$$

Структурная схема восстановления кадровой синхронизации, реализованная в соответствии с выражением (3), приведена на рис. 2.

Схема кадровой синхронизации представляет собой согласованный с видеопоследовательностью фильтр (СФ), выполняющий дис-

кретную свертку посимвольно. Для этого уровни напряжения квадратур I, Q на выходе демодулятора, соответствующие принятым точкам сигнального созвездия (рис. 2), объединяются в последовательный поток с помощью аналогового мультиплексора, который считывает и выдает данные с удвоенной символьной (битовой $Clk_Bit = 2 * Clk_Symb$) частотой. Последовательный поток данных с битовой частотой поступает на входной буфер, размер ко-

торого соответствует длине синхропоследовательности. Буфер тактируется частотой Clk_Bit . Далее отсчеты входного сигнала перемножаются с эталонной последовательностью (импульсной характеристикой СФ h_0-h_7) на четных сдвигах входного буфера. Реализация посимвольного умножения достигается тактированием умножителей либо электронных ключей символьной частотой. Выходные сигналы всех умножителей суммируются параллельным сумматором, результирующий сигнал которого поступает на пороговое устройство. Поскольку синхросигнал бинарный, умножители можно заменить инверторами уровня, что существенно упрощает техническую реализацию [10].

Очевидно, что для обеспечения устойчивой работы корреляционной схемы синхронизации [11, 12] синхропоследовательности должны обладать следующими свойствами:

- длина последовательности N должна быть равна $\log_2 m$;
- у последовательности НАКФ, вычисленной с помощью операции быстрой свертки (выражение (2)), должны отсутствовать боковые лепестки (идеальная НАКФ);
- класс последовательностей одинаковой длины N должен обладать спектром кодовых расстояний в метрике Хэмминга, позволяющим корректировать ошибки наибольшей кратности;
- класс последовательностей одинаковой длины N должен иметь хорошие взаимокорреляционные свойства.

Рассмотрим синтез класса бинарных синхропоследовательностей длиной $N=8$ с идеальной НАКФ, секциями длиной 2 бита, которые могут применяться для синхронизации систем передачи информации с QPSK и обладают вышеперечисленными свойствами.

Для получения идеальной НАКФ вида (1) рассмотрим с учетом (3) систему уравнений

$$\begin{cases} R(N-1) = R(7) = 8, \\ R(1) = R(3) = R(5) = R(9) = R(11) = R(13) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Таблица 2

Бинарные нетривиальные комбинации для свободных членов системы уравнений (5)

S_0	S_6	S_1	S_7
-1	-1	1	-1
-1	-1	-1	1
-1	1	-1	-1
-1	1	1	1
1	1	-1	-1
1	-1	1	1
1	-1	1	-1
1	1	-1	1

С учетом симметрии НАКФ достаточно найти решение относительно одной ее половины

$$\begin{cases} R(N-1) = R(7) = 8, \\ R(1) = R(3) = R(5) = 0. \end{cases}$$

Перепишем систему уравнений (4) в терминах элементов сигнально-кодовой последовательности:

$$\begin{cases} S_0 S_6 + S_1 S_7 = 0, \\ S_0 S_4 + S_1 S_5 + S_2 S_6 + S_3 S_7 = 0, \\ S_0 S_2 + S_1 S_3 + S_2 S_4 + S_3 S_5 + S_4 S_6 + S_5 S_7 = 0, \\ S_0^2 + S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 + S_5^2 + S_6^2 + S_7^2 = 8. \end{cases} \quad (5)$$

Из последней строки этой системы следует нетривиальное решение для бинарного сигнала в виде

$$|S_0| = |S_1| = |S_2| = |S_3| = |S_4| = |S_5| = |S_6| = |S_7| = 1,$$

т. е. все элементы могут принимать значения только «+1» или «-1».

Перепишем первую строку системы уравнений (5) в следующем виде:

$$S_0 S_6 = -S_1 S_7.$$

Очевидно, что для нее существует 8 нетривиальных комбинаций, представленных в табл. 2, где элемент S_0 выражен через свободные элементы системы уравнений (5) $S_0 = (S_1 S_7)/S_6$.

Используя данные табл. 2 и метод подстановки, найдем все остальные нетривиальные решения, удовлетворяющие условию бинарности. Таким образом получим все 32 решения недоопределенной системы нелинейных уравнений длиной $N=8$ (табл. 3).

Из общего числа последовательностей, обладающих идеальной НАКФ согласно (1) с учетом (2), половина (т. е. 16) сбалансированы согласно выражению

$$\sum_{i=0}^{N-1} S(i) = 0. \quad (6)$$

Сбалансированные бинарные последовательности с идеальной НАКФ приведены в табл. 4.

Графики НАКФ для бинарной последовательности четной длины $N=8$ с секциями длиной $i = 1, 2$ представлены на рис. 3.

«Идеальность» НАКФ нарушается при переходе к обработке последовательностей с линейной сверткой, однако даже в этом случае УБЛ не превышает уровня $3/8$ для всех последовательностей, приведенных в табл. 3.

Аналогично можно найти последовательности с идеальной НАКФ и для других значений длины, кратных двум.

Для оценки помехоустойчивости синхросигнала определим спектр кодовых расстояний.

Таблица 3

Бинарные последовательности с идеальной НАКФ
 $N=8$

S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1
-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1
-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
-1	-1	-1	1	1	1	-1	1
-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
-1	-1	1	-1	1	1	1	-1
-1	-1	1	1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	1	-1	1	-1
-1	1	-1	-1	-1	1	1	1
-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
-1	1	-1	1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	1	1	1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	1	1	-1	1	1	1	1
-1	1	1	1	-1	1	-1	-1
-1	1	1	1	1	-1	1	1
1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1
1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	1	1	1	1	1
1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
1	-1	1	-1	1	1	-1	-1
1	-1	1	1	-1	1	1	1
1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
1	1	-1	-1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	1	1	1	-1
1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
1	1	1	-1	1	1	-1	1
1	1	1	1	-1	1	1	-1
1	1	1	1	1	-1	-1	1

На рис. 4 приведена диаграмма кодовых расстояний между первой и m -ми последовательностями $d_{1,m}$ с идеальной НАКФ (формула (1)) и спектр кодовых расстояний в метрике Хэмминга для всех найденных последовательностей длиной $N=8$, согласно табл. 3. Здесь видно, что среднее кодовое расстояние составляет

$$d_s \approx \frac{1}{n} \sum_{d_{\min}}^{d_{\max}} dW(d) \approx 4,13, \quad (7)$$

где $W(d)$ — число кодовых слов, находящихся на расстоянии d от базового, что позволяет исправлять ошибки кратности $t = \text{int}[0,5(d_s-1)]=1$.

Для оценки устойчивости расположения сигнальных позиций созвездия QPSK относительно осей I, Q построим диаграммы скачков фазы.

Диаграмма скачков фазы сигнала с модуляцией QPSK для последовательности

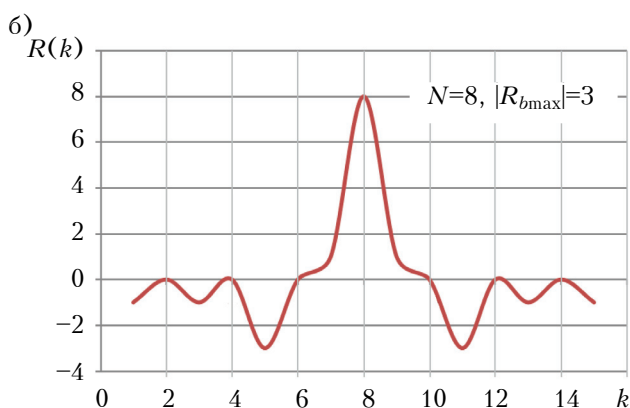
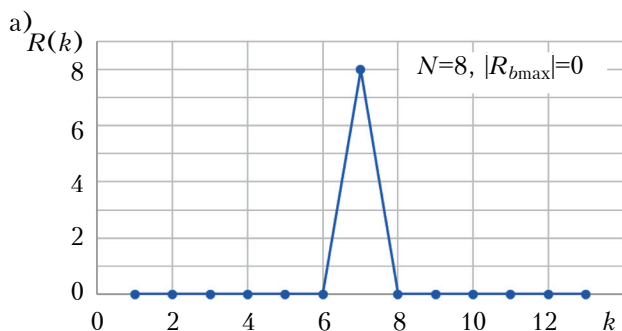


Рис. 3. НАКФ для бинарной последовательности четной длины $N=8$ с длиной секции $i=2$ (а) и $i=1$ (б)

Таблица 4

Сбалансированные бинарные последовательности с идеальной НАКФ $N=8$

S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
-1	-1	-1	1	1	1	-1	1
-1	-1	1	-1	1	1	1	-1
-1	-1	1	1	-1	1	-1	1
-1	-1	1	1	1	-1	1	-1
-1	1	-1	-1	-1	1	1	1
-1	1	-1	1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	1	1	1	-1	-1
-1	1	1	1	-1	1	-1	-1
1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1
1	-1	1	1	1	-1	-1	-1
1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
1	1	-1	-1	1	-1	1	-1
1	1	1	1	-1	-1	-1	1
1	1	1	1	-1	-1	1	-1

$S=\{-1; -1; -1; -1; -1; 1; 1; -1\}$ длиной $N=8$ с наилучшей НАКФ приведена на рис. 5. Здесь видно, что за время передачи синхронизирующей последовательности происходит перемеще-

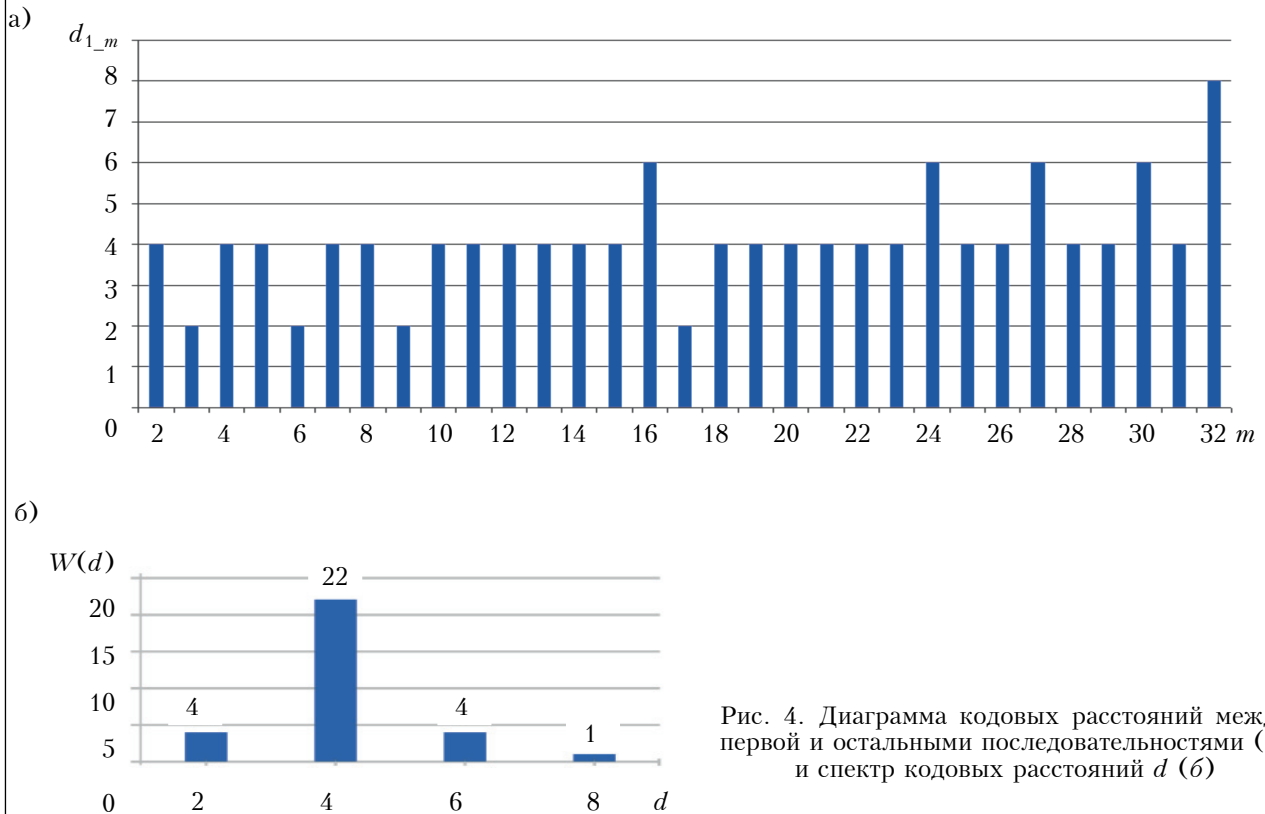


Рис. 4. Диаграмма кодовых расстояний между первой и остальными последовательностями (а) и спектр кодовых расстояний d (б)

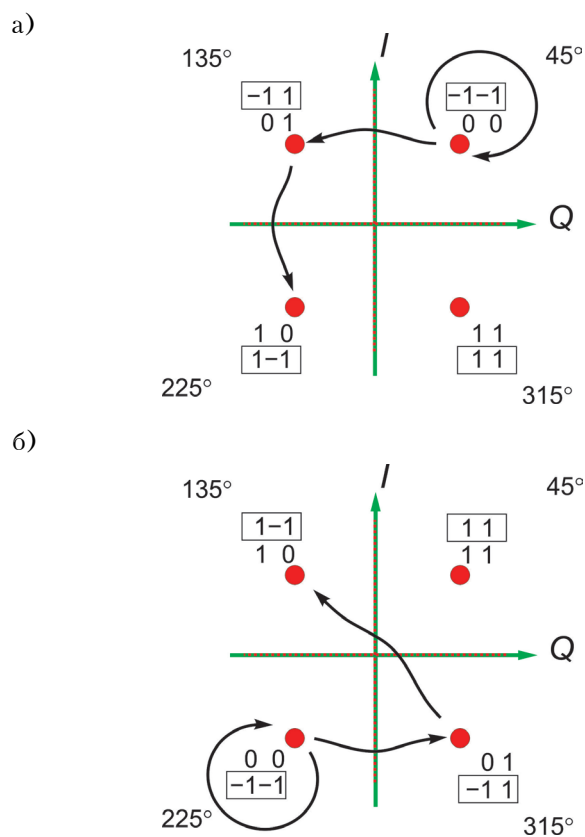


Рис. 5. Диаграмма значений фазы при QPSK-модуляции без кодирования (а) и с кодом Грея (б)

ние сигнала как минимум в трех квадрантах, что обеспечивает хорошие условия для восстановления символьной синхронизации.

Выводы

Разработанная система кадровой синхронизации для систем связи с квадратурной модуляцией на основе бинарных сигнально-кодовых последовательностей с идеальной секционированной непериодической автокорреляционной функцией позволяет упростить техническую реализацию и повысить общую помехоустойчивость системы связи. Предлагаемые последовательности обладают свойством сбалансированности и кодовым расстоянием, позволяющим корректировать однократные ошибки. Предложенный подход может быть успешно использован для синхронизации систем связи с QAM-модуляцией с большим числом сигнальных позиций, таких как QAM16, QAM64 и т. д.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мазурков М. И., Садченко А. В. Свойства дискретных АФМ-сигналов, инвариантных к m -сдвигу // Труды УНИИРТ. — 1996. — № 2. — С. 38–45.
2. Мазурков М. И., Садченко А. В., Скопа А. А. Методы передачи информации на основе циклических АФМ- и ДЧМ-сигналов, инвариантных к m -сдвигу // Информатика и связь. Сб. научных трудов УГАС. — Киев: Техника, 1996. — № 1. — С. 127–132.
3. Садченко А.В., Аверочкин В.А., Кушнirenко О.А., Петрусенко Н.А. Алгоритм синтеза бинарных синхроко-

дов произвольной длины с хорошими аperiodическими автокорреляционными функциями // Труды 13-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии» (СИЭТ-2012). — 2012. — Одесса, Украина. — С. 181.

4. Малахов В.П., А. В. Садченко Зниження складності технічної реалізації систем передачі інформації із використанням послідовностей Голда // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — 2004. — Вип. 1. — С. 138–141.

5. Никитин Н.П., Лузин В.И. Телевизионные цифровые системы. — Екатеринбург: УрФУ, 2016. — 106 с.

6. Никитин Н.П., Лузин В.И. Формирование и прием сигналов с цифровой модуляцией. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008.

7. Карякин В. Л. Цифровое телевидение. — Москва: СОЛОН-ПРЕСС, 2013. — 448 с.

8. Мазурков М. И. Системы широкополосной радиосвязи. — Одесса: Наука и техника, 2009.

9. Sadchenko A.V., Kushnirenko O.A., Troyansky A.V. The algorithm of random length sequences synthesis for frame synchronization of digital television systems // Odes'kyi

Politechnichniy Universytet. Pratsi. — 2015. — Iss. 3(47). — P. 97–103.

10. Садченко А.В., Аверочкин В.А., Кушниренко О.А. Повышение надежности синхронизации систем связи с кодовым разделением каналов // Труды 12-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии» (СИЭТ-2011). — 2011. — Одесса, Украина. — С. 191.

11. Мазурков М. И. Рекуррентный алгоритм скользящего корреляционного декодирования циклических кодов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 2000. — № 1. — С. 53–59.

12. Кушниренко О.А., Садченко А.В., Троянский А.В. Повышение помехоустойчивости «скользящего» корреляционного алгоритма распознавания печатных символов // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. — 2014. — № 4/2. — С. 32–36.

Дата поступления рукописи
в редакцию 20.10.2017 г.

А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, О. І. ЄФІМОВ, В. В. ПУНЬКО, С. Ю. ПАРОВИЙ

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: koa@onu.ua

КОРЕЛЯЦІЙНА СХЕМА КАДРОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ В СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ З QPSK-МОДУЛЯЦІЄЮ

Запропоновано схему кадрової синхронізації для QPSK-модуляції на основі бінарних послідовностей парної довжини з ідеальною автокореляційною функцією. Аналітично знайдено всі бінарні синхропослідовності довжиною $N = 8$ з властивістю ідеальності автокореляційної функції. На основі побудованого спектра кодових відстаней в метриці Хеммінга для таких послідовностей було встановлено, що вони мають коректувальну здатність, що дозволяє виправляти одноразові помилки. На основі структурних властивостей бінарних послідовностей довжиною $N = 8$ можуть бути синтезовані послідовності більшою кратної довжини -16, 32 і більше.

Ключові слова: неперіодична автокореляційна функція, QPSK, QAM, кадрова синхронізація.

DOI: 10.15222/TKEA2017.6.22
UDC 621.391.54

A. V. SADCHENKO, O. A. KUSHNIRENKO,
O. I. YEFIMOV, V. V. PUNKO, S. Y. PAROVYI

Ukraine, Odessa National Polytechnic University

E-mail: koa@onu.ua

CORRELATION SCHEME OF FRAME SYNCHRONIZATION IN COMMUNICATION SYSTEMS WITH QPSK-MODULATION

The information efficiency of communication systems using quadrature amplitude modulation is reduced because of the costs for data transmission necessary to provide frame synchronization and the required time to search for the sync signal and to go into the tracking mode of the synchronization system.

One of the most effective schemes of constructing a frame synchronization system is the correlation diagram. In order for this diagram to operate, signal-code constructions with good aperiodic autocorrelation properties are required.

The aim of this study is to develop an effective frame synchronization system for quadrature modulation communication systems based on binary signal-code sequences with an ideal sectioned non-periodic autocorrelation function.

In this paper, we propose a frame synchronization scheme for QPSK modulation based on binary sequences of even length with an ideal autocorrelation function. All binary synchronous sequences of length $N = 8$ with the idealness of the autocorrelation function are analytically found in the study. On the basis of the chart of the code distance spectrum in the Hamming metric for binary sequences of $N = 8$ length, it was established

that such sequences have a correcting ability that allows correcting single errors. Based on the structural properties of binary sequences of $N = 8$ length, sequences of a larger multiple length ($N = 16$, $N = 32$, etc.) can be synthesized.

The practical value of the proposed scheme of frame synchronization is to reduce the complexity of technical implementation and increase the overall noise immunity of the communication system. The proposed approach can be successfully used to synchronize communication systems with QAM modulation with a large number of signal positions such as QAM 16, QAM 64, etc.

Keywords: aperiodic autocorrelation function, QPSK, QAM, frame synchronization.

REFERENCES

1. Mazurkov M.I., Sadchenko A.V. [Properties of discrete APM-signals, invariant to the m-shift]. *Trudy UNIIRT*, 1996, no 2, P. 38-45. (Rus)
2. Mazurkov M.I., Sadchenko A.V., Skopa A. A. [Methods of information transfer on the basis of cyclic APM- and DFM-signals, invariant to the m-shift]. *Informatika i svyaz. Sb. nauchnykh trudov UGAS*. Kiev: Tekhnika, 1996, no 1, pp. 127-132. (Rus)
3. Sadchenko A. V., Averochkin V. A., Kushnirenko O. A., Petrusenko N. A. [Algorithm for the synthesis of binary sync codes of arbitrary length with good aperiodic autocorrelation functions]. *13th ISPC «Modern Information and Electronic Technologies» (MIET-2012)*, 2012, Odessa, Ukraine, pp. 181. (Rus)
4. Malakhov V. P., Sadchenko A. V. [Reducing the complexity of the technical implementation of information transfer systems using the sequences of gold]. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, 2004, iss.1, pp. 138-141. (Rus)
5. Nikitin N.P., Luzin V.I. *Televizionnye tsifrovye sistemy* [Television digital systems]. Yekaterinburg, UrFU, 2016, pp.106. (Rus)
6. Nikitin N.P., Luzin V.I. *Formirovaniye i priem signalov s tsifrovoy modulatsiei* [Forming and receiving signals with digital modulation]. Yekaterinburg, UGTU-UI, 2008, pp. 185. (Rus)
7. Karyakin V. L. *Tsifrovoe televidenie* [Digital television], Moscow, SOLON-PRESS, 2013, 448 p. (Rus)
8. Mazurkov M. I. *Sistemy shirokopolosnoi radiosvyazi* [Broadband radio communication systems]. Odessa, Naukaitekhnik, 2009. pp. 344. (Rus)
9. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Troyansky A. V. The algorithm of random length sequences synthesis for frame synchronization of digital television systems. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, 2015, Iss. 3(47), pp. 97-103.
10. Sadchenko A. V., Averochkin V. A., Kushnirenko O. A. [Improving the reliability of synchronization of code-division-based communication systems]. *12th ISPC «Modern Information And Electronic Technologies» (MIET-2011)*, 2011, Odessa, Ukraine, pp. 191. (Rus)
11. Mazurkov M. I. Recursive algorithm for sliding correlation decoding of cyclic codes. *Izv. Vuzov. Radioelektronika*. 2000, no 1, pp. 53-59. (Rus)
12. Kushnirenko O. A., Sadchenko A. V., Troyansky A. V. [Improving the noise immunity of the "sliding" correlation algorithm for recognizing printed characters]. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 2014, no 4/2, pp. 32-36. (Rus)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлёв Ю. И. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 3. Методы повышения надежности термоэлектрических охлаждающих устройств.— Одесса: Политехперіодика, 2018.

Книга посвящена одной из ключевых проблем проектирования термоэлектрических устройств (ТЭУ) — поиску путей повышения их надежности. Исследованы основные методы повышения показателей надежности ТЭУ: конструктивный, параметрический, структурный и комбинированный. Приведены результаты расчетов основных характеристик и показателей надежности одно- и двухкаскадных ТЭУ в зависимости от геометрии ветвей термоэлементов, токового режима работы, параметров исходных материалов термоэлементов (термоэлектрической эффективности, коэффициента термо-эдс и электропроводности) и проведен анализ полученных результатов. Также рассмотрены простейшие схемы резервирования элементов и проведен сравнительный анализ различных способов включения резерва. Показаны возможности комбинированного (совмещенного) метода повышения показателей надежности ТЭУ путем оценки совместного использования конструктивного и параметрического методов в сравнении с результатами, которые можно получить при их раздельном применении. Предназначена для инженеров, научных работников, а также студентов соответствующих специальностей, занимающихся вопросами надежности элементов электроники и в целом РЭА, а также разработкой и проектированием термоэлектрических устройств.



Dr.Sc. Yu. E. NIKOLAENKO¹, R. S. MELNYK¹,
Ph.D. A. I. RUDENKO¹, Ph.D. S.M. ROTNER²

Ukraine, Kiev, ¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»;
Odessa, ²LLC JV «LAET»

E-mail: yunikola@ukr.net

CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE HEAT FLOW IMITATOR BASED ON DIAMOND-LIKE FILMS

The paper describes features of the design and manufacturing technology of a volumetric detachable heat flow imitator designed for the study of thermal characteristics and for carrying out thermal tests of heat pipes of cooling systems for electronic equipment. The authors use thin alumina ceramic plates with deposited with diamond-like films as heating elements of the imitator. Experimental results are presented on the surface temperature of heating elements and the temperature drop between the heating elements and the heat pipe in the region of the input heat flux values from 5 to 25 W. The use of the proposed heat flow imitator allows speeding up the process of research and testing of heat pipes.

Key words: heat flow imitator, diamond-like film, heating element temperature, heat pipe.

Heat pipes (**HP**) are high effective heat transfer devices for cooling systems of electrical equipment [1–4]. Testing heat pipes for compliance with the required thermal parameters and the constant development and improvement of HPs require using methods of thermal physics control and experimental investigation of the main thermal parameters of HPs, i.e. thermal resistance, maximum heat transfer ability, temperature gradient along the HP, heating zone temperature at constant heat flux, etc. During such a research, it is necessary to supply the HP with a predetermined value of the heat flux equal to the one that is generated by the electronic device being cooled. For this purpose, different heating methods and heat flow simulators are used: radiant, interface, ohmic, inductive, electronic heaters, heating by circulating coolant, etc. [5, p. 72–76].

The heat flux imitators (**HFI**) mostly used to supply heat to the HPs are electrical resistance heaters made of wire or stripe based on a material with a high electrical resistance (e.g. nichrome) coiled around HP's heating zone [6–10]. Thus, while researching glass pulsating HPs the authors of [6, 7] used high resistance wire coiled directly on the glass case (100 mm) of the HP in the heat supply zone (30 mm). The distance between the coils several times exceeded its diameter and this allows visual observing of thermal hydraulic processes inside the HP. Such HFIs are immensely simple but their design does not allow using it for testing other HPs. In [9] authors used an HFI made from high electrical resistance stripe coiled with a variable step around the 90 mm heating

zone of a glass thermosyphon 12 mm in diameter. This HFI allows obtaining a heat flux with values from 10 to 50 W. The common drawback of all considered HFIs is that it is impossible to use them in contact with electrically conductive materials. To avoid this problem, different types of high temperature isolation are used as a layer between the heater and the HP shell [9, 10]. Such designs, however, do not allow relatively easy reinstalling of the HFI from one part of the HP to the other, or to another HP.

Also well known are HFIs that consist of a metallic heat conductive base covered with electrical isolation material and coils of the stripe heater [11]. Another type of this construction is the base with mounted cartridges with the heaters [12]. For the first case, the maximum heat flux generated by HFI with a brass cylindrical base reaches 300 W [11]. For the second type of heater with five cylindrical cartridges soldered inside a copper block (with a 25×25 mm contact surface), the maximum heat flux is 628 W [12]. The maximum value of specific heat flux is up to 100 W/cm².

Very promising are the HFIs with heaters made of doped diamond-like films. Depending on the required properties of the resistive covering, one might use Cr, W, Ti, etc. as a doping metal. Due to the diamond-like structure of the film, resistive covering of such heaters has stable electrical resistance and operational thermal stability at temperatures over 500°C, specific heat flux higher than 2·10⁵ A/cm² and temperature resistance coefficient above 10⁻⁴ [13].

One of the known HFIs based on a diamond-like film [14] consists of a 0.2–2.0 mm thick layer made of thermal conductive ceramics with a resistive heater on the surface. The resistive heater is made of a 0.2–2.5 μm thick doped diamond-like film with contact pads on it ends. However, the HFI with a flat contact surface is hard to use for heat flux supply to cylindrical HPs. To deal with this problem, the authors of [15] developed an HFI that is a metal cylindrical base, the surface of which is covered with a ceramic layer and a doped diamond-like film with contact pads. Near the base there is a round through hole that makes it possible to mount the heater onto the cylindrical HP. In doing so, it is desirable to leave the smallest possible split between the inner surface of the hole and the HP in order to provide a good thermal contact between the HFI and the HP. This requirement, however, is not always easy to fulfill in practice because of the following reason. Leak-tight sealing at the end-faces of aluminum HP shell is mostly made by welding the bottom cap and the bottom with a filler tube to the HP case using argon-arc welding. This process causes a metal overlap 1–3 mm in height (Fig. 1) at the place of welding, and one should avoid cutting it off mechanically, because the cut might open micropores. It is obvious that in such a case, the split between the HFI and the HP after welding might be 1 to 3 mm, which is unacceptable in the context of ensuring the heat transfer from the HFI to the HP with minimal contact thermal resistance.

In this paper we present an HFI based on diamond-like films, the design of which makes

it possible to mount it with a minimal split on a cylindrical HP (or thermosyphon) with a metal overlap in welding points and to reinstall from one area of the HP to other or to another HP more easily in course of research.

Design and manufacturing process of the heat flux imitator

Let us describe characteristic features of the new design of the HFI [16] based on diamond-like films (see Fig. 2).

The base 1 of the HFI is a pipe section made from a material with a high thermal conductance (e.g., aluminum or aluminum alloys) with four (or more) flat planes 2 on the outer surface and a cylindrical hole 3 into which the HP is installed. The base consists of two parts (4 and 5) which are joined by the loop 6 with anchoring elements 7 (screws, washers and nuts). Flat heaters 8 are connected to the base planes (at least 2 heaters on each plane) through a thermal contact. The heaters are based on doped diamond-like films and have contact pads 9, which are meant for electrical contact of elements to each other and for connection to the power supply.

We shall demonstrate the technology for manufacturing HFIs of the proposed design on

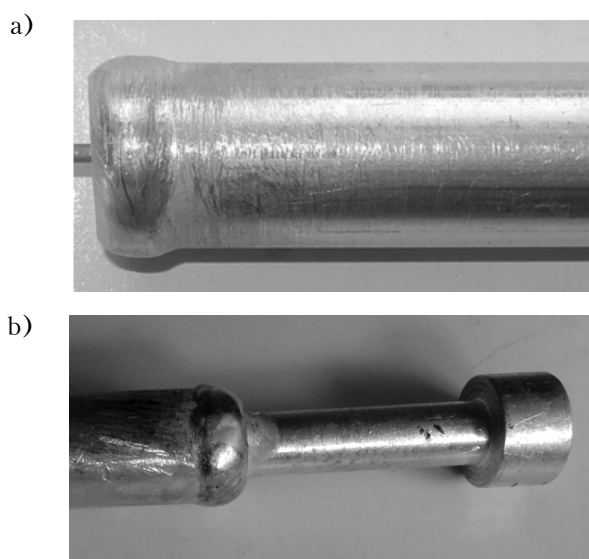


Fig. 1. Weld seams at sealing zones of the HP from the cap side (a) and from the filler tube side (b)

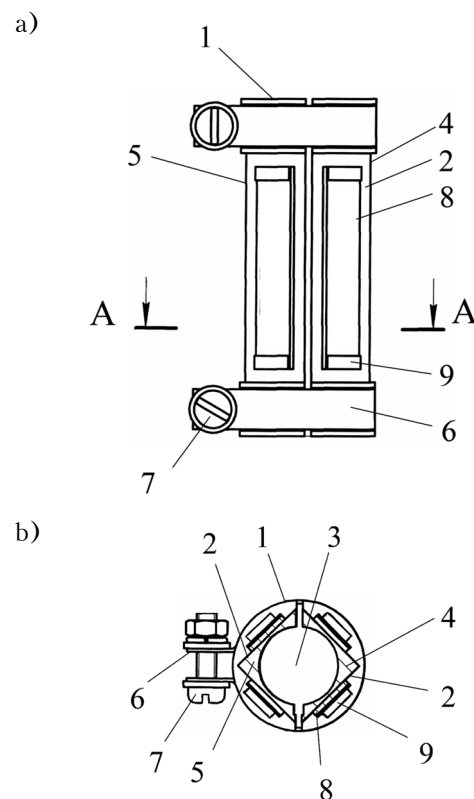


Fig. 2. HFI design: exterior view (a) and cross-section (b)

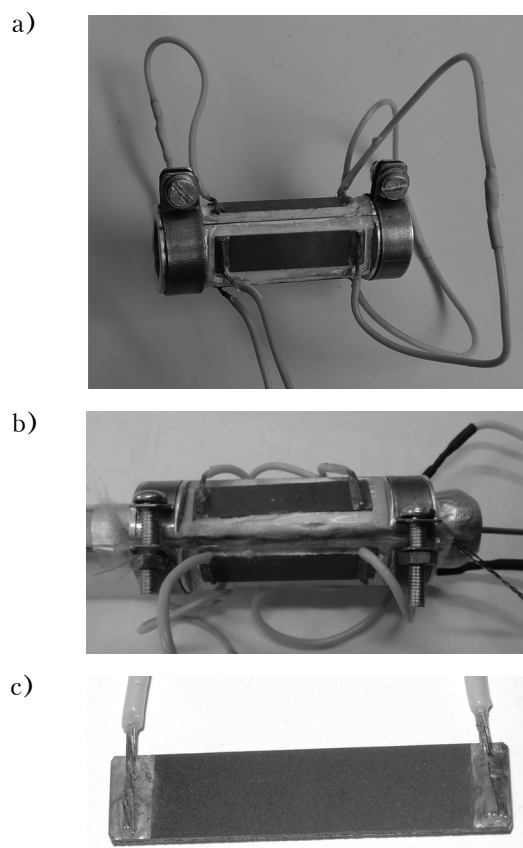


Fig. 3. Exterior view of the HFI before mounting (a) and mounted on the HP (b), and a heater based on diamond-like film (c)

the experimental HFI (**Fig. 3**). This experimental sample was made for heat supply to the HP with a 12 mm outer diameter used for LED module cooling [17].

A workpiece of the detachable base for the HFI was made from a standard pipe section with an inner diameter of 12 mm and an outer diameter of 20 mm. The material used for the base is aluminum alloy AD31T (АД31Т). Flat planes (34×13 mm) were cut out on the workpiece, and 0.5 mm deep and 6.4 mm wide grooves were lathed (these grooves were made for tightening with mounting clamps). After that, the workpiece was cut along the axis into two equal parts by a 1 mm thick disk cutter. On the inner surface of each of the parts, one longitudinal groove (1 mm wide and 1.5 mm deep) was cut for thermocouples for the HP's heating zone.

Heating elements (Fig. 3, c) were made by the JV "LAET" (СП «ЛІАЕТ», Odessa, Ukraine). Doped diamond-like films and contact pads were made using vacuum plasma-assisted deposition on 1 mm thick ceramic base according to group technology developed at the JV "LAET" [13]. The ceramic base was made of aluminum-oxide ceramics VK-94 (BK-94). The base with a diamond-like film is then cut into separate heaters (7×30×1 mm

each) by laser dicing and cutting on specialized laser equipment.

To provide thermal contact, heaters with the wires soldered to contact pads were glued to the surface of flat planes by the RTV-904 elastic silicon compound.

Method of using the HFI and research results on its thermal characteristics

To test thermal parameters of the HP with the created dismountable HFI, both its parts with attached heaters are mounted onto heating zone around the HP, then the HPs are tightened together with mounting clamps and anchoring elements. For reducing contact thermal resistance between the HP contact surface and the HFI, they are first covered with KPT-8 (KIIT-8) thermal conductive paste. To imitate the heat flux equal to the one of the electronic device being cooled, a controlled value of electrical power is fed to the HFI heaters using voltage regulator. To prevent the heat loss into the environment, the HP heating zone is insulated with basalt fibre and placed into a glass vacuum bulb.

The heat flux generated in the heaters is transferred through the elastic compound layer, which is located between the base of the imitator and the contact surfaces of the heater to aluminum base of the HFI, after which the heat power is transferred through the KPT-8 (KIIT-8) paste layer to the HP heating zone. Due to the effective heat transferring inside the HP achieved by the closed-loop evaporation condensation cycle the heat flux is transferred to the condensation zone and dissipated by natural or forced convection of air or fluid, depending on the predetermined cooling conditions.

The thermal characteristics of the created HFI sample were experimentally tested on an experimental equipment described in [16]. In the tests, an aluminum HP with a threaded capillary structure that used for the LED module cooling in the power range from 5 to 25 W. Dimensions of the HFI corresponded to those of the LED module. The diameter of the HP was 12 mm, its length was 830 mm, the length of the heating zone was 50 mm, R141b was used as a coolant. The heat was removed from the condensation zone of the HP by natural air convection at a temperature of $t_{\text{env}} = 24.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$. The HP was orientated vertically, and the heating zone was placed below.

In the course of the experiment, the temperature t_{he} of the heating elements and the temperature difference Δt between the heating elements and the HP was measured at the heat flux values of $P = 5 - 25$ W.

The temperature of each heating element was measured by the thermocouple mounted in the middle of the diamond-like film. Thermocouple junctions were electrically isolated with glass-fibre adhesive tape. The surface temperature of the HP at the heating zone was measured by four thermocouples.

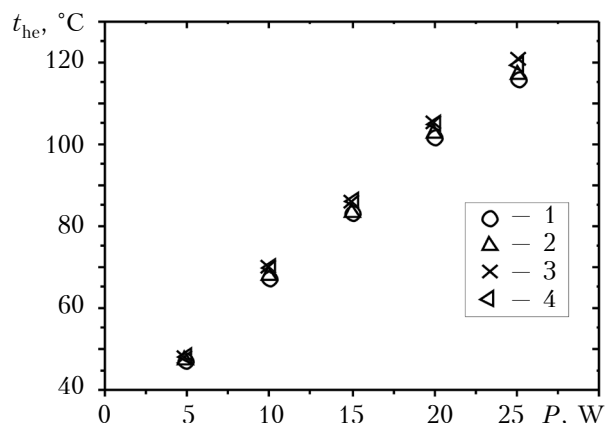


Fig. 4. The temperature dependence of the heating elements (1–4) on the heat flow of the simulator

Fig. 4 shows measured values of the temperature t_{he} of the heating elements of the HFI experimental sample for the supplied power P in range from 5 to 25 W. It is evident that the diagram is linear. Moreover, for $P = \text{const}$, the temperature of the heating elements differs by no more than 5°C. For example, for $P = 25$ W, element no 3 has a maximum value of temperature equal to 120.6°C, while element no 1 has a minimum value of temperature equal to 115.6°C. These results prove that of the contact thermal resistance values between the heating elements and the base of the HFI, as well as between the base and the HP are identical. The low temperature value of the HFI is reached due to favorable conditions of heat removal from the diamond-like film of the heating element, which in turn are caused by good thermal contact between flat surfaces. It simplifies thermal insulation conditions of the heated surfaces during the HP testing.

Fig. 5 shows the diagram for the temperature difference Δt between the average values of heating elements' temperatures (t_{he}^{av}) and the temperature in the HP heating zone relative to the supplied heat power P . As seen from the figure, as the power increases from 5 to 25 W, the temperature difference Δt increases from 3.2 to 12.0°C. While the t_{he}^{av} temperature varies from 47.3 to 118.1°C, and the difference between t_{he}^{av} and environment temperature ($t_{env} = 24^\circ\text{C}$), respectively, from 23.3 to 94.1°C. Thus, the contribution of the temperature difference Δt between the HFI and the HP temperatures in the overall temperature gradient in the cooling system is about 13%, which indicates that the overall thermal resistance of the HFI based on a diamond-like film (0.64–0.48°C/W) is rather low and that it is possible to use it to study the thermal characteristics of the HP.

Summary

The proposed design of heat flux imitator based on diamond-like films is meant for experimental

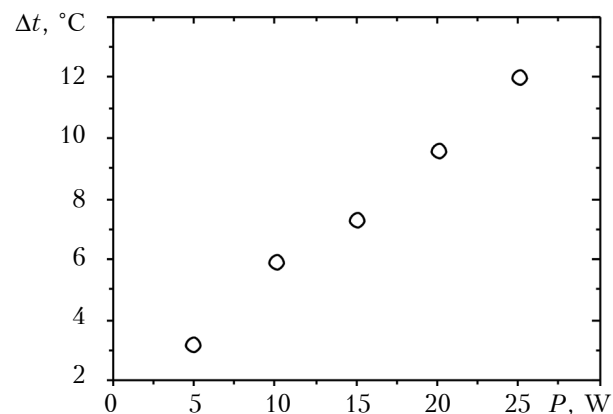


Fig. 5. Dependence of the temperature difference between the heaters and the HP on the supplied heat flux at $t_{env} = 24^\circ\text{C}$

research of thermal parameters of heat pipes. The detachable design of the imitator allows mounting it on a cylindrical heat pipe with overlaps on welding seams while providing a reliable thermal and mechanical contact. Such imitator can be easily remounted from one section of the HP to another or even to another HP altogether during tests. The imitator has a compact design that allows obtaining significant heat fluxes. For example, a heat flux of 806.67 W can be reached for a 50 mm long test sample with a hole diameter of 12 mm, with four 7×30×1 mm heaters based on diamond-like films with a total electric resistance of 60 Ohm when to a regulated power source with an output voltage of up to 220 V.

Due to the listed features, the proposed design of the heat flux imitator has a wider exploitation potential in comparison to the existing analogues.

REFERENCES

1. Khayrnasov S.M. [Application of heat pipes in the systems providing thermal conditions REA: current state and prospects]. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2015, no. 2-3, pp. 19-33. (Rus). <https://doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.19>
2. Baturkin V.M., Nikolaenko Yu.E., Galyautdinov D.M., Vladimirov I.T. [Effective cooling of powerful super high-frequency microelectronic unit]. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2007, no. 3, pp. 46-50. (Rus).
3. Masataka Mochizuki, Thang Nguyen, Koichi Mashiko, Yuji Saito, Tien Nguyen, Vijit Wuttijumnong. A review of heat pipe application including new opportunities, *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*, 2011, vol. 2, 013001. pp. 1-15. <https://doi.org/10.5098/fhp.v2.1.3001>
4. Nikolaenko Yu.E., Bykov E.V., Lozovoy M.A., Khayrnasov S.M., Khmelev Yu.A. [Ways to reduce the temperature of the crystal LED in the chandelier with aluminum heat pipes]. *Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference «Modern Information and Electronic Technologies»*, Ukraine, Odessa, 2014, vol. 2, pp. 24-25. (Rus). <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/17475>
5. Ivanovskii M.N., Sorokin V.P., Chulkov B.A., Yagodkin I.V. *Tekhnologicheskie osnovy teplovykh trub* [Technological bases of heat pipes]. Moscow, Atomizdat, 1980 (Rus).
6. Zhi Hu Xue, Wei Qu. Experimental and theoretical research on the ammonia pulsating heat pipe: the new full visualization of the flow pattern and the operating mechanism, *International Journal of Heat and Mass Transfer*,

2017, vol. 106, pp. 149-166. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.042>

7. Alekseyik E.S., Kravets V.Yu. [Influence of the number of turns on the heat transfer characteristics of pulsating heat pipes]. *East-European Journal of Advanced Technologies*, series: Energy-saving technologies and equipment, 2010, iss. 6/7 (48), pp. 59-63. (Rus).

8. Asirvatham L.A., Wongwises S., Babu J. Heat transfer performance of a glass thermosyphon using graphene-acetone nanofluid. *Journal of Heat Transfer*, 2015, vol. 137, pp. 111502-1-111502-9. <https://doi.org/10.1115/1.4030479>

9. L. Vasiliev Jr., M. Rabetsky, A. Kulakov, L. Vasiliev, Z. M. Li. An advanced miniature copper heat pipes. In: *Proceedings of the VII Minsk International Seminar «Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources»*, Minsk, Belarus, 2008, vol. 1, pp. 336-344. https://www.researchgate.net/publication/255790604_An_advanced_miniature_copper_heat_pipes_development_for_cooling_system_of_mobile_PC_platform

10. Khayrnasov SM, Rassamakin B.M. Alexeek E.S., Anisimova A.A. [Performance characteristics of aluminum thermosyphons for a combined solar collector]. *Naukovi ivisti NTUU «KPI»*, 2014, no 6, pp. 42-48. (Ukr).

11. Hussam Jouhara, Anthony J. Robinson. Experimental investigation of the small diameter two-phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-

3283. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30, pp. 201-211. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.08.007>

12. Ji Li, Daming Wang, G. P. «Bud» Peterson. A compact loop heat pipe with flat square evaporator for high power chip cooling. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2001, vol. 1, no. 4, pp. 519-527. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2010.2099531>

13. Pat. 67527 A Ukraine. [Method of obtaining a resistive coating]. S. M. Rotner, V. E. Nikitin, 2004, byul no 6. (Ukr).

14. Pat. 5311 Russian Federation. [Heater]. A.B. Elagin, S.M. Rotner, V.V. Saltykov, 1997. (Rus). http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=5311&TypeFile=html

15. Pat. 2772 Ukraine. [Heater]. C.M. Rotner, 2004, byul no 8. (Ukr).

16. Pat. 121573 Ukraine. [The simulator of the heat flow]. Yu.E. Nikolaenko, R.S. Melnik, O.I. Rudenko, S.M. Rotner, 2017, byul no 23. (Ukr). <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/21497>

17. Nikolaenko Yu.E., Kozak D.V. [Thermal resistance of an aluminum gravitational heat pipe with a threaded capillary structure], *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2017, no. 4-5, pp. 24-31. (Rus). <https://doi.org/10.15222/TKEA2017.4-5.24>

Received 08.12 2017

DOI: 10.15222/TKEA2017.6.29
УДК 536.248

Д. т. н. Ю. Є. НИКОЛАЄНКО¹, Р. С. МЕЛЬНИК¹,
к. т. н. О. І. РУДЕНКО¹, к. ф.-м. н. С. М. РОТНЕР²

¹Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського»;
м. Одеса, ²ТОВ СП «ЛАЕТ»
E-mail: yunikola@ukr.net

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ІМІТАТОРА ТЕПЛООВОГО ПОТОКУ НА ОСНОВІ АЛМАЗОПОДІБНИХ ПЛІВОК

Описано особливості конструкції і технології виготовлення об'ємного рознімного імітатора теплового потоку, призначеного для дослідження теплових характеристик і проведення теплових випробувань теплових труб систем охолодження електронної апаратури. Як нагрівальні елементи імітатора використовуються тонкі пластинки з алюмооксидної кераміки з нанесеними на них алмазоподібними плівками. Наведено результати експериментального дослідження температури поверхні нагрівальних елементів і перепаду температури між нагрівальними елементами і тепловою трубою в області значень підведеного теплового потоку від 5 до 25 Вт. Використання запропонованого імітатора теплового потоку дозволяє прискорити процес дослідження та випробування теплових труб.

Ключові слова: імітатор теплового потоку, алмазоподібна плівка, температура нагрівального елемента, тепла труба.

Д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО¹, Р. С. МЕЛЬНИК¹,
к. т. н. О. И. РУДЕНКО¹, к. ф.-м. н. С. М. РОТНЕР²

¹Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»;
г. Одесса, ²ООО СП «ЛАЭТ»
E-mail: yunikola@ukr.net

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИМИТАТОРА ТЕПЛООВОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК

Описаны особенности конструкции и технологии изготовления объемного разъемного имитатора теплового потока, предназначенного для исследования тепловых характеристик и проведения тепловых испытаний тепловых труб систем охлаждения электронной аппаратуры. В качестве нагревательных элементов имитатора используются тонкие пластинки из алюмооксидной керамики с нанесенными на них алмазоподобными пленками. Приведены результаты экспериментального исследования температуры поверхности нагревательных элементов и перепада температуры между нагревательными элементами и тепловой трубой в области значений подводимого теплового потока от 5 до 25 Вт. Использование предложенного имитатора теплового потока позволяет ускорить процесс исследования и испытания тепловых труб.

Ключевые слова: имитатор теплового потока, алмазоподобная пленка, температура нагревательного элемента, тепловая труба.

A. F. BELYANIN¹, V. V. BORISOV², S. A. DAGHETSYAN³, S. A. EVLASHIN²,
A. A. PILEVSKY², V. A. SAMORODOV²

Russia, Moscow, ¹Central Research Technological Institute "Technomash",

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, ³Lomonosov Moscow State University

E-mail: belyanin@cnititm.ru

CARBON NANOWALLS IN FIELD EMISSION CATHODES

The carbon nanowall (CNW) layers were grown from a gas mixture of hydrogen and methane, activated by a DC glow discharge, on Si substrates (Si/CNW layered structure). The second layer of CNW was grown either on the first layer (Si/CNW/CNW structure) or on Ni or NiO films deposited on the first CNW layer (Si/CNW/Ni/CNW and Si/CNW/NiO/CNW structures). The composition and structure of the resulting layered structures were studied using scanning electron microscopy, Raman spectroscopy, and X-ray diffractometry. It was found that annealing of Si/CNW structure in vacuum, growing of the second CNW layer on Si/CNW, as well as deposition of Ni or NiO films prior to the growing of the second CNW layer improve functional properties of field emission cathodes based on the electron-emitting CNW layers.

Keywords: carbon nanowalls, layered structures, electron microscopy, Raman spectroscopy, field emission cathodes.

Carbon materials, including various crystalline (diamond, graphite) and noncrystalline (fullerene, nanotubes, graphene, etc.) ordered substances with unique physicochemical properties are of practical interest. Some carbon materials due to the autoemission property are promising for use as an emitting layer of field emission cathodes (autocathodes). The presence of field emission means a decrease in the electric field strength to 1–10 V/μm, which is required for the onset of field emission of electrons. Autocathodes are used in the development of X-ray tubes, microwave devices, electron guns for exciting lasers, cathodoluminescent lighting devices, flat displays and other devices [1–5]. The most promising for the creation of autocathodes with a low electron emission barrier are the so-called carbon nanowalls (CNW) — layers of a plate-like carbon material with a predominant orientation of the plates perpendicular to the substrate [1–3].

The layers of carbon materials formed by plasma methods, including CNW, are as a rule multiphase layers [6–8]. The structure and concentration of crystalline and X-ray amorphous phases depend on the conditions for carbon materials formation and affect their emission properties. The problems of using CNW in autocathodes are associated with the instability of emission parameters (magnitude and density of the cathode current, as well as the degree of electrical current uniformity over the

cathode area) due to changes in composition and structure during testing and operation [4, 6, 8].

Before being placed into electrovacuum devices and soldered, autocathodes are always preliminarily tested in a vacuum chamber for compatibility with the parameters of the device. In some cases, preliminary tests are carried out to achieve such required parameters as autoemission current and its stability in time. Stability tests can be performed both in the voltage stabilization mode [4] and in the current stabilization mode. In the first case we consider cathode current dependence (decrease) on time at a fixed stabilized voltage, in the second case — voltage dependence (growth) on time at a fixed stabilized current. In both cases, the graphs of the dependencies (hereinafter aging curves) objectively characterize the degradation (aging) of the autocathode, regardless of what causes it.

Storing the tested autocathodes with CNW layers on open air also leads to a deterioration of their emission properties. This is caused by the fact that during vacuum testing on the surface of CNW plates, the layer of adsorbed hydrocarbons is destroyed. This layer normally prevents adsorption of the components of the air mixture (water and nitrogen molecules, etc.) that impair the emission characteristics of the autocathodes [4, 15]. To recover the emission properties of autocathodes that had passed preliminary tests, they are annealing in vacuum or in an inert gas

atmosphere at a temperature of about 720 K [6]. Autocathodes that had not passed preliminary tests (even without vacuum breakdown), as a rule are not further used.

We can assume that autocathodes with a second CNW layer should have better emission properties than autocathodes with only the first CNW layer annealed. Moreover, for autocathodes that had not been preliminarily tested, growing of the second CNW layer on top of the first one should increase the yield ratio for vacuum electronics.

This study researches how vacuum annealing and growing of a second CNW layer affects the emission properties of layered autocathodes based on carbon nanostructures.

Samples used in the research

The CNW samples were grown on Si substrates from a gas mixture of hydrogen (H_2) and methane (CH_4) activated by a DC glow discharge [3, 6]. Before growing CNW, priming carbon centers were created on the substrate. For this purpose, at a temperature of 1020 K, the surface of the substrate was bombarded with H^+ and $C_xH_y^+$ ions (high frequency discharge, 13.56 MHz, 40 W, 20 min), formed in the microwave plasma mixture of hydrogen and methane (8–10 volume % CH_4) at pressure of $6,6 \cdot 10^3$ Pa. Silicon substrates with seed particles were treated in H_2 plasma, after which a CNW layer was grown at a substrate temperature of 800–1300 K and a deposition rate of $6 \mu m/h$. Emission characteristics of the obtained Si/CNW layered structures were tested for 0.5 hour.

Si/CNW structures that were tested and/or stored in the open air for a long time (1 to 3 years) were either annealed in vacuum, or a second CNW layer was grown on their surface under the same conditions as the first layer. In a vacuum (10^{-3} – 10^{-5} Pa), the samples were annealed for 1.5 hours at 720 K (Si/CNW(ann) structure). When the second layer was grown, the crystallites of the first layer acted as seed centers of the second layer. The second layer of CNW was also grown on the surface of the first layer of CNW coated with Ni or NiO.

Ni films were obtained by magnetron sputtering from a Ni target with a direct current in an argon atmosphere (Si/CNW/Ni structure). The conditions for obtaining Ni films are as follows: Ar pressure 1.2–1.5 Pa; discharge power 900 W; substrate temperature 420–570 K; deposition rate $1.5 \mu m/h$. The thickness h of the resulting Ni films was 10, 40, 80, and 160 nm (Si/CNW/Ni^h structures).

NiO films were formed in two stages. At the first stage, a 0.25% solution of $Ni(NO_3)_2$ was applied to the CNW layer in a 50% hydroalcoholic

($H_2O + C_2H_5OH$) mixture at room temperature, followed by heat treatment at 420 K. The heat treatment caused the crystalline hydrate $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ formed during heat treatment to decompose to NiO form at a temperature of 370–410 K.

$Ni(NO_3)_2$ was deposited at atmospheric pressure either by immersing the substrate with a CNW layer in a solution, followed by heat treatment (the result was the Si/CNW/NiO structure) or by aerosol precipitation (5–10 cycles of 1 minute with heat treatment after each cycle, the result was the Si/CNW/NiO* structure). To generate the aerosol, the Albedo IN-8 (Альбе́до ИИ-8) halogenator was used with an average mass median aerodynamic diameter of the aerosol particles of $3.94 \mu m$.

Research technique

The CNW composition and the layered structures were studied using a Carl Zeiss Supra 40-30-87 scanning electron microscope (SEM), a Rigaku D/MAX-2500/PC X-ray diffractometer (CuK radiation) and a LabRAM HR800 (HORIBA Jobin-Yvon) laser Raman scattering spectrometer (632.8 nm line of He-Ne laser, beam spot diameter $4 \mu m^2$, depth of the analyzed layer $3 \mu m$).

Current-voltage (I-V) characteristics and aging curves that determine the dependence of voltage on time during long-term emission tests at a given current in the regime of constant current stabilization were obtained using a Pw2500_v2_3kV_1a source of stabilized pulsed current produced by SINP MSU and a Spellmann SI30 source of stabilized direct current. The measurements were carried out in diode cells at a pressure of $5 \cdot 10^{-5}$ Pa.

To correctly compare the structures with the second layer of CNW, each sample with the first CNW layer was divided into two parts (A, B) equal in area which were used to co-grow a second layer of CNW in one charge. Part A was used as control, and part B was covered with a Ni or NiO layer, then the A:Si/CNW/CNW and B:Si/CNW/Ni/CNW (or B:Si/CNW/NiO/CNW) structures were compared. In the tests with annealing, the second CNW layer was not grown onto part B, while the first CNW layer was annealed, then the A:Si/CNW/CNW and B:Si/CNW(ann) structures were compared.

The I-V characteristic and the autoemission parameters of the samples were recorded in the pulsed mode of electric current measurement. The aging curves and their parameters were measured in the constant stabilized current mode.

Field emission tests were carried out on samples with a surface having intrinsic conductivity.

During measuring the I-V characteristic in the pulsed mode, a glass plate with a conductive layer of mixed indium-tin oxide (ITO, chemical formula: $(\text{In}_2\text{O}_3)_{0.9}(\text{SnO}_2)_{0.1}$) was used as an anode. The plate was covered with a luminophore layer. This anode completely covered the emitting surface of the sample. When measuring the aging curves in the constant stabilized current mode (10 mA), a water-cooled thick-walled (5 mm) copper anode was used with a polished working surface in the form of a $5 \times 2 \times 2$ mm strip located above the 4×2 mm rectangular area of the autocathode.

The gap (Δ) between the surface of the autocathode and the anode was 250 μm when measured in pulsed mode and 125 μm — in direct current mode. The I-V characteristics were plotted in the coordinates (E, J), where $E = U/\Delta$ is the electric field strength in the gap between the anode and the autocathode, $J = I/S$ is the current density, U is the potential difference between the electrodes; I is the current of the autocathode, S is the working area of the autocathode. According to the I-V characteristics, Fowler–Nordheim diagrams were plotted in ($E^{-1}, \ln(J/E^2)$) coordinates.

Composition and structure of CNW

Carbon nanowalls are a porous material formed by curved lamellar (scaly) clusters of X-ray amorphous and crystalline phases of carbon (Fig. 1).

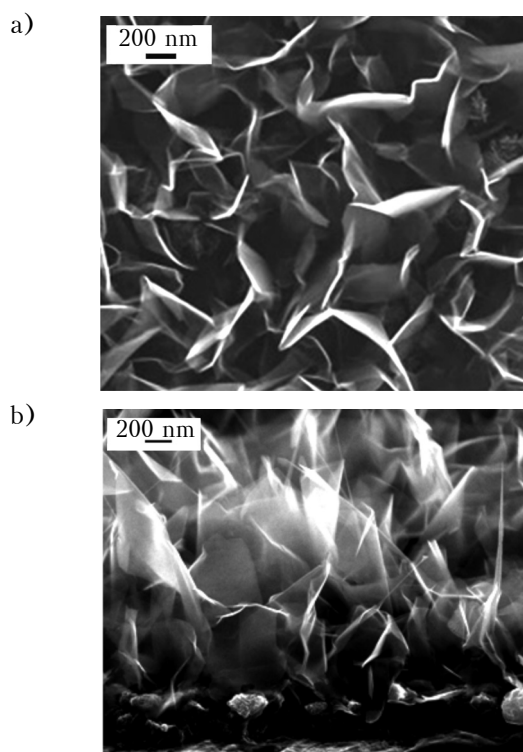


Fig. 1. SEM image of the Si/CNW layer structure: *a* — CNW growth surface; *b* — Si/CNW cleavage

The CNW plates were 3–10 nm thick [3]. Apart from bent carbon plates, the structure of CNW samples also contain rods (plates folded into tubes), nanotubes and equiaxed particles with an average size of 40–50 nm (Fig. 1, *b*).

X-ray diffractometry shows that CNW contains mainly graphite ($P6_3/mmc$ spatial group) and carbyne (hexagonal syngony), as well as phases of diamond ($Fd\bar{3}m$), chaotite ($P6/mmm$ spatial group) and graphite modifications ($R3$ and $P3$ spatial groups) [6, 8]. The thickness of the CNW plates corresponds to the size of the crystallites (X-ray coherent scattering regions, L_{CSR}) equal to 8.5–9.5 nm and calculated from the broadening on X-rays of diffraction peaks of 0002 graphite.

In the Raman spectra of the Si/CNW layer structure, which explicitly reflect the composition and structure of CNW [9, 10], we can observe intense D , G and $2D$ bands, located at the Raman shift $\Delta\nu$, equal to 1330–1343, 1577–1591 and 2660–2673 cm^{-1} , respectively. At the same time, weak bands are fixed at $\Delta\nu$ equal to 233–243, 863–879 and 1081–1167 cm^{-1} (x band); 1612–1627 (D' band); 2449–2482 ($x+D$ band); 2909–2934 ($D+G$ band) and 3221–3248 cm^{-1} ($2D'$ band). (In this study we denote CNW Raman spectral bands as D , G , x , D' , $x+D$, $2D$, $D+G$ и $2D'$ [11–13].)

Fig. 2 (curve 1) shows the Raman spectrum of one of the Si/CNW samples. The values of the intensity ratio of the main CNW Raman spectral bands depending on their formation conditions have a considerable spread: $I_D/I_G = 0.32–2.03$; $I_D/I_{2D} = 0.98–1.23$; $I_D/I_{D+G} = 14.1–17.6$; $I_D/I_{2D'} = 13.0–16.1$ [6, 8].

The CNW Raman spectra were compared with similar spectra of highly oriented pyrolytic UPV-1T (УПВ-1Т) graphite (Fig. 2, curve 2). The $2D$ graphite band consists of two components: $2D_1$ and $2D_2$ (Fig. 2, curves 3, 4) with an intensity proportional to the one of the G band. In contrast to the $2D$ graphite band, the $2D$ CNW band is symmetrical, which is characteristic of graphene [9, 13]. The differences in the $2D$ band in the CNW and graphite Raman spectra are caused by a significant curvature of individual regions of the graphite atomic layers $\{0001\}$, which disrupts atomic bonds inside and between the layers.

Depending on the degree of the CNW plates curvature (curvature radius 590–770 nm), the $2D$ band changes shape, which reflects changes in the electronic bands corresponding to the positions of atoms in the lattice. The layers in such a crystallite (CNW plates) form a hexagonal lattice (two-layer stacking of carbon atoms) [1, 6, 14]. If we consider the CNW crystallites as graphite plates, then their size (plate thickness) calculated

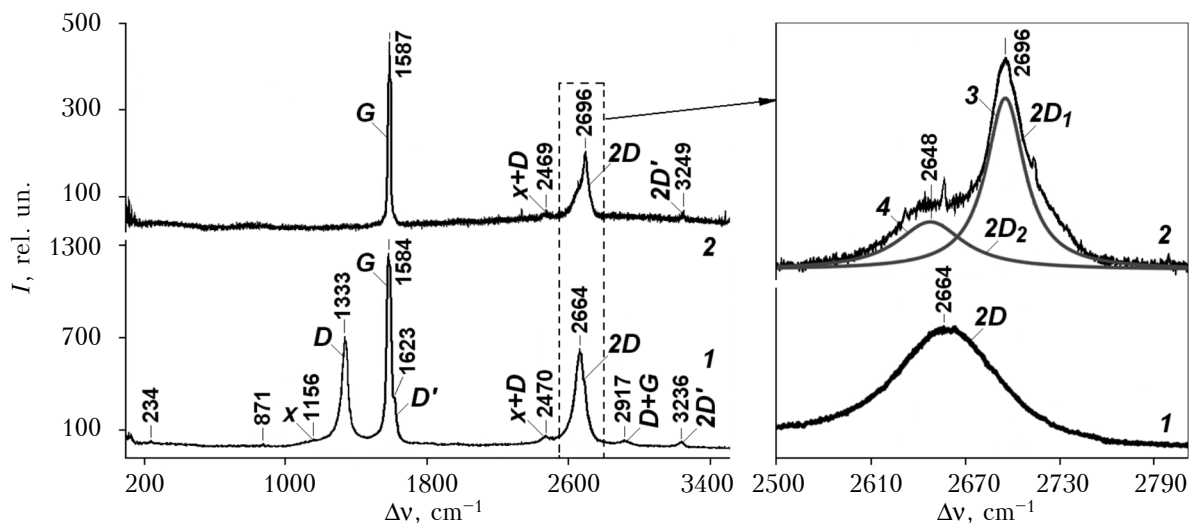


Fig. 2. Raman spectra of Si/CNW (1) and graphite (2) layered structures. Inset graph shows a fragment of the spectra in the $\Delta\nu$ range of 2550–2800 cm^{-1} (3 and 4 are Lorentz distribution functions, which in sum approximate curve 2)

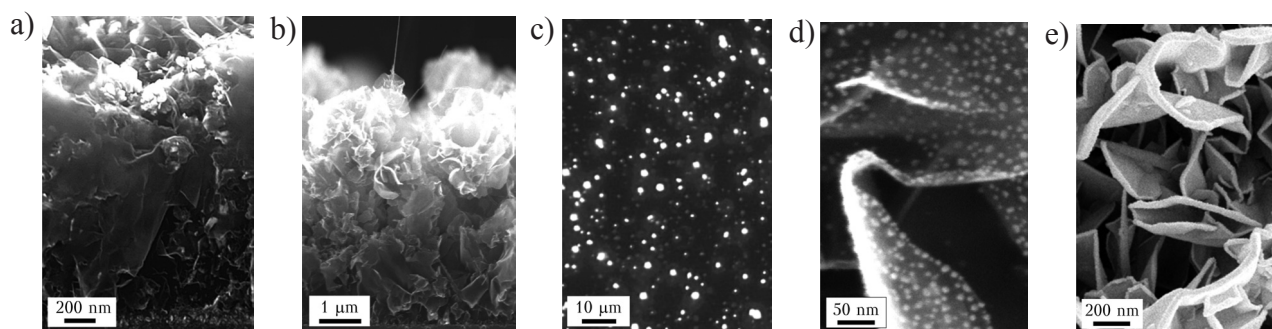


Fig. 3. SEM images of the samples:

a – Si/CNW (cleavage); *b* – Si/CNW/NiO*/CNW (cleavage); *c* – Si/CNW/NiO*; *d* – Si/CNW/Ni¹⁰; *e* – Si/CNW/Ni⁸⁰

from the intensity ratio of the *D* and *G* (I_D/I_G) Raman spectral bands would be $L = 3.3 - 9.9$ nm. The obtained size is close to the values calculated from the X-rays. Taking into account that the interplanar distance of graphite (0001 plane) is 0.335 nm, one can state that there are about 10–30 layers of graphene in a CNW plate.

The maximum height of the first CNW layer starting from the substrate is 2–4 μm , the total height of the first and second layers is approximately 8.5 μm (Fig. 3, *a*, *b*). After the heat treatment of the Si/CNW layered structure covered with $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ crystal hydrate, NiO crystallites less than 2 μm in size were formed on the surface of the CNW (Fig. 3, *c*). The deposition of a 10 nm thick Ni film on the CNW layer (Si/CNW/Ni¹⁰ structure) by magnetron sputtering resulted in the formation of an islet structure with a cluster size less than 10 nm (Fig. 3, *d*). A continuous Ni^{*h*} film (thickness $h > 40$ nm) was formed mainly on the CNW edges located at a 90°

angle to the Ni particles flux during magnetron sputtering (Fig. 3, *d*). On all other CNW surfaces, the Ni film thickness was by orders of magnitude smaller.

Fig. 4, *a*, *b* shows the globular structure of the CNW layers with a globule diameter of 1.5–2 μm . The second layer of CNW, deposited on a NiO film, has a more dense packing of globules and a larger thickness of the plates (Fig. 4, *d*). Samples A:Si/CNW/CNW and B:Si/CNW/Ni¹⁰/CNW (Fig. 4, *a*, *b*) contain a large number of nanotubes with a diameter of 10–40 nm, while in samples with Ni or NiO films their number does not exceed 1–2 per globule.

The structure of the second CNW layer is characterized by the presence of carbon plates on the crystallites (plates) of the first layer, including multiwall nanotubes (Fig. 4, *c*). In the Si/CNW/Ni¹⁶⁰/CNW and Si/CNW/NiO*/CNW samples, thickened crystallites of carbon plates with rounded edges (not typical) were found (Fig. 4, *d*, *e*). It was discovered that on average

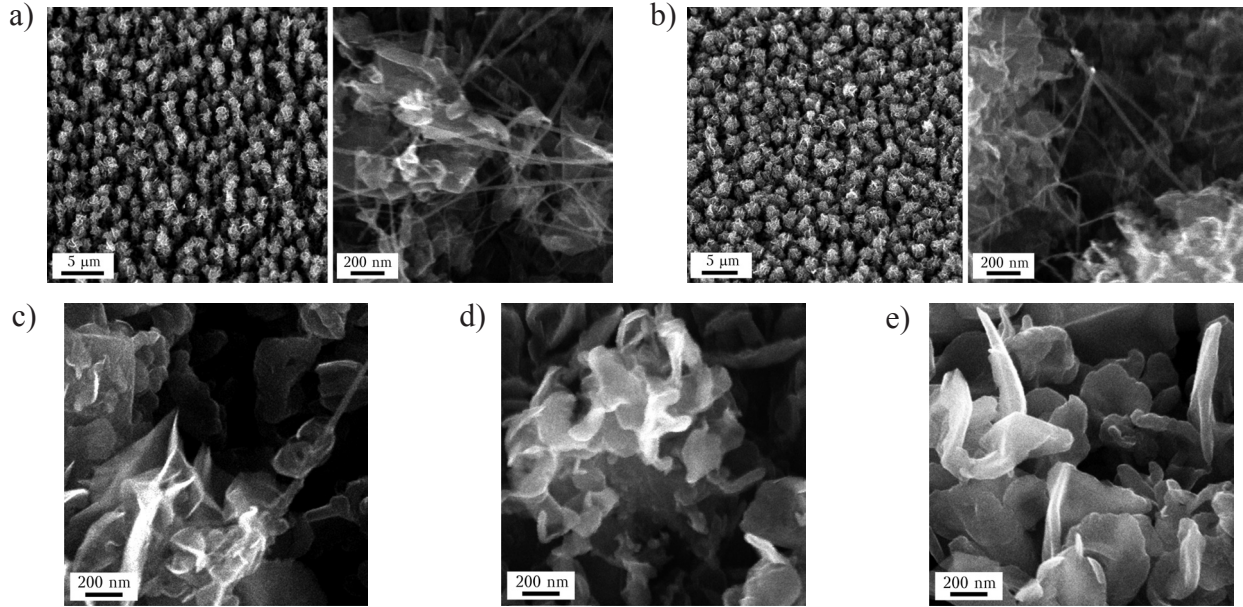


Fig. 4. SEM images of surfaces of layered structures:

$a - A_1\text{:Si/CNW/CNW}$; $b - B_1\text{:Si/CNW/Ni}^{10}\text{/CNW}$;
 $c - B_2\text{:Si/CNW/Ni}^{10}\text{/CNW}$; $d - \text{Si/CNW/Ni}^{160}\text{/CNW}$; $e - \text{Si/CNW/NiO}^*\text{/CNW}$
 (right-hand images in a and b are scaled-up fragments of the surface of the second CNW layer)

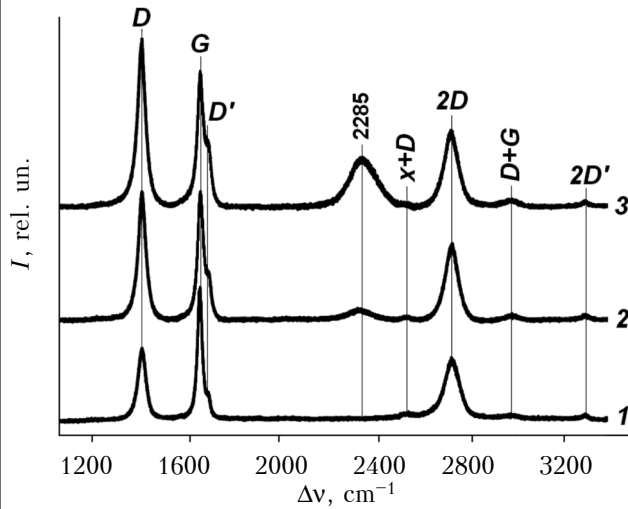


Fig. 5. CNW Raman spectra before and after growing the second CNW layer:

1 – $A\text{:Si/CNW}$; 2 – $A\text{:Si/CNW/CNW}$;
 3 – $B\text{:Si/CNW/NiO}^*\text{/CNW}$

the maximum height of the second CNW layer was 2.4 times greater than that of the first; the globular structure of the second CNW layer became more dense and homogeneous; the number of multiwall nanotubes decreased; on the Raman spectrum of the second CNW layer with a globular structure, a band appeared at $\Delta\nu = 2285 \text{ cm}^{-1}$ (**Fig. 5, Table 1**).

The Raman spectra shown in Fig. 5 are normalized to the intensity of the $2D$ (I_{2D}) band. On the Raman spectra of the $\text{Si/CNW/NiO}^*\text{/CNW}$ structure, the band intensity at $\Delta\nu = 2285 \text{ cm}^{-1}$ increased almost 4-fold. The wide band at $\Delta\nu = 2262 - 2286 \text{ cm}^{-1}$ (broadening of the $\Delta\nu_{1/2} = 120 - 160 \text{ cm}^{-1}$ band) was manifested in the Raman spectra of CNW after annealing at temperatures above 870 K [7]. A similar band was also observed on the Raman spectra of polycrystalline diamond films produced by the microwave discharge method [3].

The crystallite size (L_{CSR}), the number of graphene layers (N), and the I_{2D}/I_D parameter

Table 1

Structural parameters of the upper layer of CNW layered structures

Layered structure	$\Delta\nu_{1/2}, \text{ cm}^{-1}$	I_D	I_G	$I_{D'}$	I_{2D}	I_D/I_G	L_{CSR}	N	$I_{D'}/I_G$	I_{2D}/I_D	I_{2D}/I_G	I_{2285}
Si/CNW	19.4	228.3	388.8	113.4	202	0.6	7.5	22	0.3	0.9	0.5	0
Si/CNW/CNW	17.7	340.6	338.1	130.5	202	1.0	4.4	13	0.4	0.6	0.6	337
Si/CNW/NiO*/CNW	19.9	442.4	356.9	176.5	202	1.2	3.6	10	0.5	0.5	0.6	130.2

of the samples $A:Si/CNW$; $A:Si/CNW/CNW$ and $B:Si/CNW/NiO^*/CNW$ (in this order) decreased, while the I_D/I_G , I_{2D}/I_G parameters and I_{2285} band intensity increased (Table 1).

Emission properties of CNW-based autocathodes

Simultaneously with the I-V measurement, a sequence of images was registered on an luminophore anode screen. Obviously, in this sequence, you should select an image with the worst visual uniformity, which is located in the middle part of the sequence, while at its beginning and at its end there are images that are visually evaluated as homogeneous: almost black ones, obtained at small electric fields, at the beginning, and lighted ones, obtained at large electric fields, at the end (Fig. 6).

To assess the uniformity of images, subjective (visual) criteria are often used. Of the many objective homogeneity criteria based on digital image processing, we chose the simplest criterion based on variation coefficient. We used the intensity (brightness) of a pixel in a gray raster image as the random variable. Uniformity of the image (in percent) was calculated from a sample consisting of all pixels of the image, according to the formula

$$H = 100V - 33,$$

where V is variation coefficient, $V = \sigma/\bar{X}$; σ and $\bar{X}$ are the mean square deviation and average linear deviation in the sample, respectively.

In statistical data processing, the sample is considered homogeneous if $V \leq 0.33$ ($H \leq 0\%$). For the sequence of images obtained from the luminophore anode screen, maximum of H (the worst homogeneity) was taken as homogeneity H^A . As can be seen from Fig. 6, the visual estimation of homogeneity coincides with the maximum at $H^{250} = -16.8\%$. The H^A parameter can be regarded as an estimate of the homogeneity of the cathode current distribution in the working region of the autocathode at the Δ gap.

It is known [4, 15] that the electric field around a pointed conductor is amplified and can be represented as βE_0 , where β is the field gain

near a single emitter and approximately equals to the aspect ratio (height/transverse dimension) of the conductor; E_0 is the ideal electric field strength equal to U/Δ . Assuming that all emission centers have regular geometry (the same sizes and relative position), the dependencies on the Fowler–Nordheim (FN) diagrams are described by the equation of the straight line $y = Bx + C$, where $x = 1/E$, $y = \ln(J/E^2)$. The slope ratio of the straight line B is a value proportional to β , while the density of the emissive centers D_E is proportional to the $\exp(C)$ value (C is the segment cut off by the straight line on the ordinate axis).

For the given films, a linear region can be distinguished on the curves of the FN diagrams [17]. For a relative comparison of the values characterizing emission properties of the autocathodes, it is sufficient to assume that in this linear region only emission centers with regular geometry generate the electrical current, while the contribution of the others to the resulting current is negligible [4, 15]. As emission characteristics of the autocathodes, we considered the following: the autoemission threshold, E_T , is the minimum value of E at which the emission current is registered; the estimation of the aspect number of a single emitter in the regular geometry β ; the estimation of density of emission centers in the regular geometry D_E ; homogeneity H^{250} in a sequence of emission images.

The aging curves (AC) for the structures with the second CNW layer were obtained as the voltage U on time T dependence at a constant current of 10 mA, measured in the current stabilization mode. The 10 mA value of current was chosen due to the capabilities of the equipment available, as well as to current density limitations ($J \approx 0.12$ mA/cm²), at which undesirable vacuum breakdowns are unlikely in the test cell. The aging curves allowed determining the aging rate for 6 hours (V_{6h}), for 3 hours (V_{3h}) and for the last hour (V_{1h}) of tests. A comparison of the aging curves of A and B parts of samples with a second CNW layer was carried out using the Q_{AB} parameter that takes into account the relative position of these curves

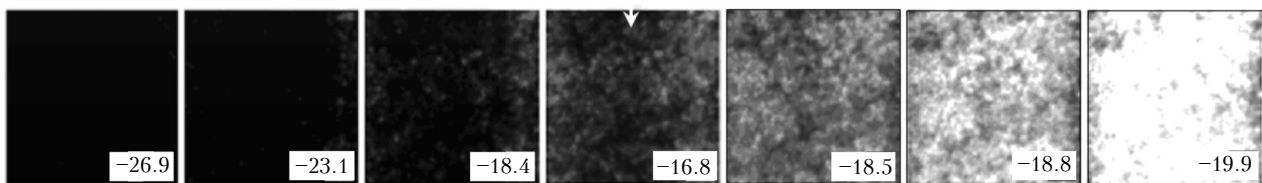


Fig. 6. Sequence of 2x2 mm emission images with different homogeneity H^{250} (the values in % are given in the images)

along the ordinate (U) and the ratio of the areas bounded by these curves and the abscissa axis:

$$Q_{AB} = (S_A / (S_A + S_B)) - 0.5,$$

where S_B is the area under the AC_B for $B:Si/CNW/Ni^h/CNW$, $B:Si/CNW/NiO/CNW$, $B:Si/CNW(ann)$;

S_A is the area under the AC_A of the corresponding B control structures $A:Si/CNW/CNW$ (or $A:Si/CNW$ in the case of annealing).

If the AC_B is located above the AC_A , then $-0.5 < Q_{AB} < 0$ (part B has a higher voltage); if AC_B is located below AC_A , then $0.5 > Q_{AB} > 0$ (part B is less high-voltage). The smaller $|Q_{AB}|$, the closer are the AC_A and AC_B areas. At the same time, the $|Q_{AB}| < 0.5$ inequality is valid.

Fig. 7 presents the I-V characteristic curves and the FN lines described above for the parts of a single sample of layered structure, and their parameters are given in **Table 2**. As can be seen from the presented data, the parts without the second CNW layer ($A:Si/CNW$ и $B:Si/CNW$) are characterized by a high autoemission threshold ($E_T \geq 5.6$ V/ μ m), a large aspect ratio β (which confirms the presence of a large number

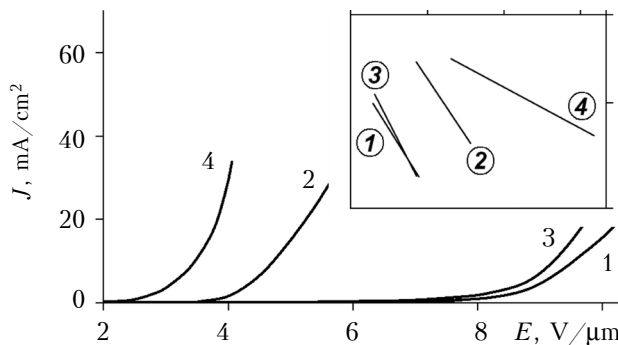


Fig. 7. Example of the I-V characteristics and their linear representations in the FN coordinates (see inset) obtained for the following layered structures:

- 1 – $A:Si/CNW$; 2 – $B:Si/CNW/NiO^*/CNW$;
3 – $B:Si/CNW$; 4 – $A:Si/CNW/CNW$

of multiwall nanotubes on the first CNW layer), a low density of emission centers D_E , and a low homogeneity of field emission images ($H^{250} \geq 0$).

Parts with a second CNW layer (structures $B:Si/CNW/NiO^*/CNW$ and $A:Si/CNW/CNW$) are characterized by a lower autoemission threshold ($E_T \leq 3.6$ V/ μ m), a smaller value of β , a higher D_E density, as well as a better images uniformity ($H^{250} \leq 0$). For a given sample, the part with the $A:Si/CNW/CNW$ structure is characterized by better values of the parameters E_T , β , H^{250} , V_{3h} , V_{1h} than the $B:Si/CNW/NiO^*/CNW$ structure, and the values of the D_E parameter for them are virtually identical.

Examples of the arrangement of the I-V characteristics and the aging curves of the samples with the $Si/CNW/NiO^*/CNW$ (sample 1) and $Si/CNW(ann)$ (sample 2) structures are shown in **Fig. 8, 9**.

As can be seen from Fig. 8, for sample 1, the I-V characteristic of the $B_1:Si/CNW/NiO^*/CNW$

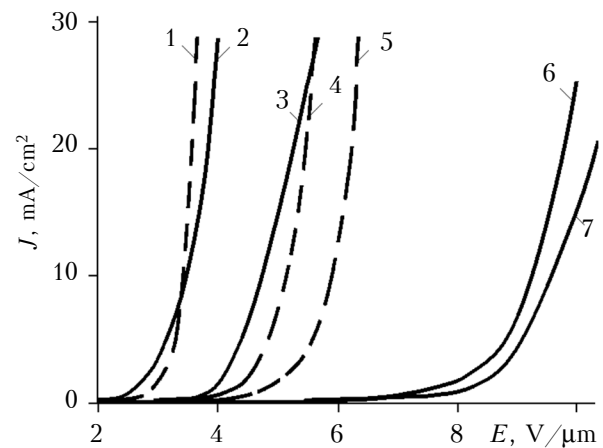


Fig. 8. I-V characteristics of layered structures of two samples:

- Sample 1 (solid lines): 2 – $B_1:Si/CNW/NiO^*/CNW$; 3 – $A_1:Si/CNW/CNW$; 6 – $A_1:Si/CNW$; 7 – $B_1:Si/CNW$;
Sample 2 (dashed lines): 1 – $A_2:Si/CNW/CNW$;
4 – $B_2:Si/CNW(ann)$; 5 – $A_2:Si/CNW$

Table 2

Example of emission characteristics of autocathode parts on layered structures

Structure	Measuring mode							
	Pulse				Continuous			
	E_T , V/ μ m	β	$\ln(D_E)$	H^{250} , %	V_{6h} , V/h	V_{3h} , V/h	V_{1h} , V/h	Q_{AB}
$A:Si/CNW$	6.1	42.7	1.9	39.07	—	—	—	—
$B:Si/CNW/NiO^*/CNW$	3.6	32.9	6.0	−10.52	50	33	10	0.18
$B:Si/CNW$	5.6	47.0	3.0	29.36	—	—	—	—
$A:Si/CNW/CNW$	2.4	21.1	5.9	−7.18	10	0	0	—

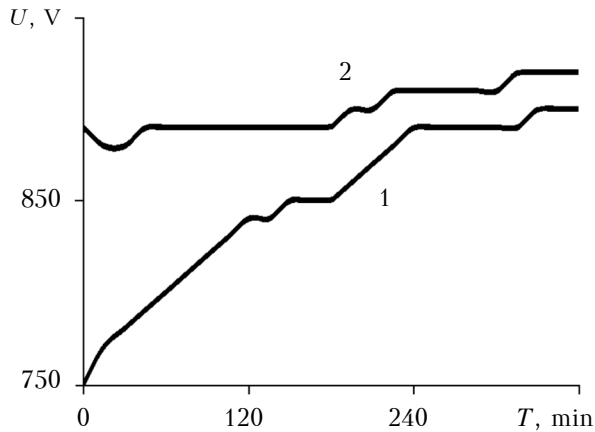


Fig. 9. Aging curves of layered structures of sample 1 for 6 hour tests:

1 – B_1 :Si/CNW/NiO*/CNW; 2 – A_1 :Si/CNW/CNW

structure (curve 2) is shifted to the left by $4 \text{ V}/\mu\text{m}$ relative to the I-V characteristics of the A_1 :Si/CNW and B_1 :Si/CNW structures (curves 6, 7) and by $1.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ relative to the I-V characteristic for the A_1 :Si/CNW/CNW (curve 3).

For sample 2, the I-V characteristic of the B_2 :Si/CNW(ann) structure (curve 4) is shifted to the left by $0.8 \text{ V}/\mu\text{m}$ relative to the I-V characteristic of the A_2 :Si/CNW (curve 5) and to the right by $1.8 \text{ V}/\mu\text{m}$ relative to the I-V characteristic of the A_2 :Si/CNW/CNW (curve 1). This indicates that the emission properties of the autocathode

with a second CNW layer deposited on the NiO* oxide layer have improved in comparison with the autocathode with the second CNW layer without the oxide, as well as that the emission properties of the autocathode with the second CNW layer have improved in comparison with an autocathode that had only undergone a restorative annealing of the first CNW layer.

According to the data from Table 2 and Fig. 9, for B_1 :Si/CNW/NiO*/CNW and A_1 :Si/CNW/CNW structures, the Q_{AB} parameter is 0.1 for 6 hours of testing, 0.18 for 3 hours and 0.08 for the last hour. In this case, the AC_B for B_1 :Si/CNW/NiO*/CNW turns out to be less high-voltage than the AC_A for A_1 :Si/CNW/CNW, but it loses to the AC_A in the aging rate. The behavior of the AC_A and AC_B during 6 hour tests ($Q_{AB} = 0.1$) shows their asymptotic convergence at positive values of Q_{AB} , which can be explained by the fact that the second CNW layer on the A_1 and B_1 parts was grown simultaneously during the same charge.

A summary data of the averaged characteristics of the investigated autocathodes is presented in Table 3. The averaging was carried out according to the groups (samples) of the parts of the layered structures indicated in the table. The sample sizes corresponded to the number of parts in each of the groups.

The analysis of the data from Table 3 shows the following. Regardless of which film is used

Table 3

Mean values (M) and standard deviations (S) of the emission characteristics of parts of autocathodes on layered structures

Structure	Sample size	Measurement mode							
		Pulse			Continuous				
		$E_T, \text{ V}/\mu\text{m}$	β	$\ln(D_E)$	$H^{250}, \%$	$V_{3h}, \text{ V}/h$	$V_{1h}, \text{ V}/h$		
A :Si/CNW; B :Si/CNW	26	M	4.5	60.6	7.2	11.8	—	—	—
		S	1.3	24.7	2.5	19.9	—	—	—
A :Si/CNW/CNW	13	M	2.3	37.5	9.2	−2.5	20.0	10.8	—
		S	1.1	20.5	3.0	17.7	21.3	13.2	—
B :Si/CNW (ann)	3	M	3.1	53.3	10.2	−14.2	11.1	13.3	−0.01
		S	0.1	9.1	1.4	10.8	10.2	15.3	0.41
B :Si/CNW/NiO/CNW	2	M	3.5	58.2	13.0	−6.0	5.0	15.0	0.44
		S	0.3	4.3	0.9	3.6	21.2	21.2	0.06
B :Si/CNW/NiO*/CNW	2	M	2.6	33.6	8.5	2.1	16.7	10.0	0.32
		S	1.3	1.0	1.7	17.8	23.6	0	0.19
B :Si/CNW/Ni ¹⁰ /CNW	3	M	1.9	34.1	10.0	−16.4	14.4	3.3	0.14
		S	0.3	11.4	1.7	2.8	5.1	5.8	0.32
B :Si/CNW/Ni ⁴⁰ /CNW	1	M	2.2	36.5	6.8	−2.9	26.7	0	−0.48
B :Si/CNW/Ni ⁸⁰ /CNW	1	M	2.9	35.4	7.4	−7.3	20.0	10.0	−0.50
B :Si/CNW/Ni ¹⁶⁰ /CNW	1	M	3.2	53.4	13.1	−3.8	13.3	0	−0.12

(Ni or NiO), the presence of the second CNW layer reduces the average value of the E_T emission threshold to about 2.3 V/ μm as compared to the average value of 4.5 V/ μm for the first CNW layer. The average E_T values for the second CNW layer structures with or without Ni, NiO film differ by approximately 0.1%. On average, the best results for the E_T parameter (1.9 V/ μm) were shown by the Si/CNW/Ni¹⁰/CNW structures, for which the aging rate is also minimal ($V_{1h} \approx 3.3$ V/h) with a positive Q_{AB} value of 0.14. The best V_{1h} results had the Si/CNW/Ni⁴⁰/CNW and Si/CNW/Ni¹⁶⁰/CNW structures ($V_{1h} = 0$) at low E_T values, however for these structures the Q_{AB} parameter turned out to be negative.

Because of the large number of multiwall nanotubes [16], the autocathodes without both the second CNW layer and restorative annealing of the first CNW layer showed the best results for the β parameter (60.5 on average) with a low density of emission centers ($D_E \approx 10^3$, $\ln(D_E) = 7.2$). Then the β parameter was decreasing in structures with a second layer in the following order: Si/CNW/NiO/CNW and Si/CNW/Ni¹⁶⁰/CNW. These same structures with the minimum number of multiwall nanotubes showed the best result for the D_E parameter ($D_E \approx 10^5$, $\ln(D_E) = 13$).

As to the homogeneity of the emission images, the best results on the average were shown by the Si/CNW/Ni¹⁰/CNW structures ($H^{250} = -16.4\%$). Then the H^{250} parameter was getting worse (increasing) in structures in the following order: Si/CNW(ann), Si/CNW/Ni⁸⁰/CNW, Si/CNW/NiO/CNW, Si/CNW/Ni¹⁶⁰/CNW, Si/CNW/Ni⁴⁰/CNW, Si/CNW/NiO*/CNW, and finally the worst were Si/CNW structures.

Conclusion

Thus, the analysis of the I-V characteristics and aging curves of autocathodes based on Si/CNW, Si/CNW/CNW, Si/CNW/Ni/CNW and Si/CNW/NiO/CNW layered structures, as well as the assessment of homogeneity of the images obtained on the luminiferous anode screen allowed establishing the following. On average, the emission properties of autocathodes with a second CNW layer and the presence (optional) of a Ni or NiO film between the CNW layers are better than those of autocathodes that undergo restorative vacuum annealing of the first layer at 720 K. Of all the tested autocathodes with a second layer, the best results on the emission characteristics were shown by the autocathodes with 10 nm thick islet Ni films, which indicates the possibility to use similar cathodes in vacuum electronics. However, for better statistical validity, it is necessary to collect a larger amount of experimental data.

REFERENCES

1. Tzeng Y., Chen C-L., Chen Y-Y., Liu C-Y. Carbon nanowalls on graphite for cold cathode applications. *Diamond and Related Materials*, 2010, vol. 19 (2-3), pp. 201-204.
2. Wang H-X., Jiang N., Zhang H., Hiraki A. Growth of a three dimensional complex carbon nanoneedle electron emitter for fabrication of field emission devices. *Carbon*, 2010, vol. 48, pp. 4483-4488. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2009.08.005>
3. Belyanin A.F., Borisov V.V., Bagdasarian A.S. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal*, 2017, vol. 5, no. 3, pp. 22-40. (Rus)
4. Egorov N., Sheshin E. Field emission electronics. *Springer Series in Advanced Microelectronics*, 2017, vol. 60, pp. 568, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-56561-3>
5. Busta H.H., Chen J.M., Shen Z., Jansen K., Rizkowski S., Matey J., Lanzillotto A. Characterization of electron emitters for miniature X-ray sources. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2003, vol. 21, pp. 344–349. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56561-3>
6. Belyanin A.F., Borisov V.V., Samoylovich M.I., Bagdasarian A.S. On the effect of laser irradiation and heat treatment on the structure and field-emission properties of carbon nanowalls. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2017, vol. 11, no. 2, pp. 295-304. <http://dx.doi.org/10.1134/S1027451017020057>
7. Belyanin A.F., Borisov V.V., Nalimov S.A., Bagdasarian A.S. *Nanomaterials and nanostructures - XXI century*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 34–42. (Rus)
8. Belyanin A.F., Samoylovich M.I., Borisov V.V., Evlashin S.A. [Study of multiphase carbon films of field emission cathodes electron microscopy, raman spectroscopy and X-ray diffraction method]. *Nano- and Microsystems Technology*, 2014, no. 2, pp. 20-25. (Rus)
9. Ferrari A.C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nanodiabatic effects. *Solid State Communications*, 2007, vol. 143, pp. 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.03.052>
10. Pimenta M.A., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S., Cancado L.G., Jorio A., Saito R. Studying disorder in graphite-based systems by Raman spectroscopy. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2007, vol. 9, pp. 1276-1291. <http://dx.doi.org/10.1039/B613962K>
11. Ferrari A.C., Meyer J.C., Scardaci V., Casiraghi C., Lazzeri M., Mauri F., Piscanec S., Jiang D., Novoselov K.S., Roth S., Geim A.K. Raman spectrum of graphene and graphene layers. *Physical Review Letters*, 2006, vol. 97, 187401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.187401>
12. Shang N.G., Staedler T., Jiang X. Radial textured carbon nano flake spherules. *Applied Physics Letters*, 2006, 89, 103112. <https://doi.org/10.1063/1.2346314>
13. Jackson Di Martino Thornton. *Carbon Nanowalls: Processing, Structure and Electrochemical Properties*. A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University, 2011, 55 p.
14. Tzeng Y., Chen W. L., Wu C., Lo J-Y., Li C-Y. The synthesis of graphene nanowalls on a diamond film on a silicon substrate by direct-current plasma chemical vapor deposition. *Carbon*, 2013, vol. 53, pp. 120-129. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.10.038>
15. Eletskaia A. V. Carbon nanotube-based electron field emitters. 2010 *Phys.-Usp.* 53 863. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0180.201009a.0897>
16. Borisov V.V., Pilevskii A.A., Samorodov V.A. *Nanomaterials and nanostructures - XXI century*, 2017, vol. 8, no. 2, pp. 37-41. (Rus)
17. Smol'nikova E.A. *Investigation of the structural and autoemission characteristics of nanografic cold cathodes*. A dissertation submitted to the Graduate, 2015, Lomonosov Moscow State University, 146 p. (Rus)

Received 21.11 2017

DOI: 10.15222/ТКЕА2017.6.34
УДК 538.911: 538.975

А. Ф. БЕЛЯНИН¹, В. В. БОРИСОВ², С. А. ДАГЕСЯН³,
С. А. ЄВЛАШИН², А. А. ПІЛЕВСЬКИЙ², В. А. САМОРОДОВ²

Росія, м. Москва, ¹ЦНДТІ «Техномаш», ²НДІ ядерної фізики ім. Д. В. Скобельцина МДУ;

³Московський державний університет ім. М. В. Ломоносова

E-mail: belyanin@cniit.ru

ВУГЛЕЦЕВІ НАНОСТІНКИ В АВТОЕМІСІЙНИХ КАТОДАХ

Вуглецеві матеріали, що включають різні кристалічні (алмаз, графіт) і некристалічні (фуллерен, нанотрубки, графен та ін.) впорядковані речовини з унікальними фізико-хімічними властивостями, представляють практичний інтерес. Деякі вуглецеві матеріали завдяки властивості автоемісії є перспективними для використання як емітуючого шару автоемісійних катодів (автокатодів). Найбільш перспективними для створення автокатодів з низьким бар'єром емісії електронів вважаються так звані вуглецеві наностінки (C_H) — шари пластинчастого вуглецевого матеріалу з переважним орієнтуванням пластин перпендикулярно підкладці. Роботу присвячено дослідженню впливу відпалу в вакуумі і нарощування другого шару C_H на емісійні властивості шаруватих автокатодів на основі вуглецевих наностінок.

Шари C_H для досліджень вирощували з газової суміші H_2 і CH_4 , активованої тліючим розрядом постійного струму, на підкладках з Si . Перед нарощуванням C_H на підкладках створювалися вуглецеві затравочні центри шляхом обробки поверхні іонами H^+ та C_H^+ . Емісійні характеристики отриманих шаруватих структур Si/C_H контролювали піводинними випробуваннями. Піддані випробуванням та/або тривалому зберіганню на відкритому повітрі шаруваті структури Si/C_H або відпалювали в вакуумі (1,5 години при 720 K), або на їх поверхні нарощували другий шар C_H ($Si/C_H/C_H$) за тих же умов, що і перший. Другий шар C_H нарощували також на поверхні першого шару C_H , вкритого плівкою Ni або NiO (структури $Si/C_H/Ni/CH$ та $Si/C_H/NiO/C_H$). Плівки Ni отримували методом магнетронного розпилення, а плівки NiO — термічною обробкою в розчині $Ni(NO_3)_2$. Максимальна висота першого шару C_H щодо підкладки становила 2–4 мкм, сумарна висота першого і другого шарів — 8,5 мкм. Склад і будову шаруватих структур досліджували з використанням растрової електронної мікроскопії, рентгенівської дифрактометрії і спектрометрії комбінаційного розсіювання світла.

Емісійні властивості представлено у вигляді статистичних оцінок порогу автоемісії, коефіцієнту посилення електричного поля поблизу одиночного автоемітера і щільності емісійних центрів в регулярній геометрії, однорідності емісійних зображень, а також швидкості старіння автоемісійних катодів за тривалих випробувань на постійному стабілізованому струмі. Розроблена методика випробувань дозволила проводити коректне порівняння емісійних характеристик автоемісійних катодів до і після вирощування другого шару C_H , а також після відпалу в вакуумі. Встановлено, що в середньому емісійні властивості автокатодів з другим шаром C_H і плівкою Ni або NiO між шарами C_H є кращими, ніж у автокатодів, які пройшли відновлювальний відпал у вакуумі першого шару за температури 720 K. Відзначено, що з усіх досліджених автокатодів з другим шаром C_H найкращі результати за емісійними характеристиками в середньому показали автокатоди з острівковими плівками Ni товщиною 10 нм. Проведені дослідження підтверджують можливість застосування шаруватих автокатодів на основі вуглецевих наностінок в пристроях вакуумної електроніки.

Ключові слова: вуглецеві наностінки, шаруваті структури, електронна мікроскопія, спектроскопія комбінаційного розсіювання світла, автоемісійні катоди.

Д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН¹, В. В. БОРИСОВ², С. А. ДАГЕСЯН³,
к. ф.-м. н. С. А. ЄВЛАШИН², А. А. ПІЛЕВСЬКИЙ², В. А. САМОРОДОВ²

Россия, г. Москва, ¹ЦНИТИ «Техномаш», ²НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцина,

³Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

E-mail: belyanin@cniit.ru

УГЛЕРОДНЫЕ НАНОСТЕНКИ В АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДАХ

Слои углеродных наностенок (C_H) выращивали из газовой смеси водорода и метана, активированной тлеющим разрядом постоянного тока, на подложках из Si (слоистая структура Si/C_H). Второй слой C_H выращивали на первом слое (структура $Si/C_H/C_H$) или на пленках Ni или NiO , осажденных на первом слое C_H (структуры $Si/C_H/Ni/CH$ и $Si/C_H/NiO/C_H$). Методами растровой электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния света и рентгеновской дифрактометрии исследованы состав и строение полученных слоистых структур. Установлено, что отжиг в вакууме структуры Si/C_H , наращивание на Si/C_H второго слоя C_H , а также нанесение пленок Ni или NiO перед наращиванием второго слоя C_H приводят к улучшению функциональных свойств автоэмиссионных катодов на основе слоев C_H , эмитирующих электроны.

Ключевые слова: углеродные наностенки, слоистые структуры, электронная микроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света, автоэмиссионные катоды.

*Dr. Sc. L. I. ANATYCHUK^{1,2}, Ph.D. R. R. KOBYLIANSKYI^{1,2}, Dr. Sc. R. G. CHERKEZ²,
Ph.D. I. A. KONSTANTYNOVYCH², V. I. HOSHOVSKYI³, V. A. TIUMENTSEV²*

Ukraine, Chernivtsi, ¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,

²Yurii Fedkovych Chernivtsi National University,

Lviv, ³State Science and Production Enterprise «Termoprylad-3»

E-mail: romakobylianskyi@ukr.net

THERMOELECTRIC DEVICE WITH ELECTRONIC CONTROL UNIT FOR DIAGNOSTICS OF INFLAMMATORY PROCESSES IN THE HUMAN ORGANISM

The paper presents a thermoelectric device capable of simultaneously measuring the temperature and density of heat fluxes on the surface of a human body with the help of a developed thermoelectric sensor with a thermostated free surface, thus excluding the effect of ambient temperature on the sensor readings. A special computer programme has been developed for processing the measurement results by way of accumulating and reproducing them in a specified form on a personal computer, which enables monitoring the temperature and thermal state of a human in real time. The specific features of the device design and its technical characteristics are given.

Keywords: thermoelectric device, electronic control unit, temperature sensor and heat fluxes, inflammatory processes in the human body.

There are a large number of high-efficiency optical devices based on thermocouple sensors for radiometric measurements, e.g. Angstrom compensating pyrheliometers, etc. [1–3]. However, in this paper, heat fluxes were measured using gradient semiconductor thermoelectric sensors that have a narrow specific application in medical and biological thermometric measurements [4–8]. The peculiarity of such sensors is that they do not require compensation heaters, which can distort the temperature and heat flux distributions of the biological objects under study.

Semiconductor thermoelectric sensors of heat flux [9–15], which combine miniaturization, high sensitivity, stability of parameters in a wide range of operating temperatures and compatibility with modern electronic recording equipment, are known to be promising for testing human local heat release. The use of such sensors allows achieving high locality and accuracy of thermometric measurements. This, in its turn, makes it possible to obtain information on the characteristics of the objects under study and analyze them in detail in order to identify the inflammatory processes of the human body at an early stage.

An important factor in the study of human body heat fluxes with the help of such sensors is the accuracy and speed of recording the signals of thermoelectric sensors. Previously developed thermoelectric devices with electronic control units [16–20] have certain drawbacks, the main one being the dependence of the thermoelectric sensor readings on the ambient temperature.

This study presents the modernized thermoelectric device with an electronic control unit for diagnosing inflammatory processes in the human body. The device contains a thermoelectric sensor with a thermostated free surface to improve the accuracy of thermometric measurements for medical and biological purposes.

Design and technical characteristics of the device

The appearance of the developed thermoelectric device intended for measuring the temperature and density of the heat flux of the surface of the human body by contact method and its block diagram are shown in **Fig. 1, 2**, and its technical characteristics are given in the **Table**.

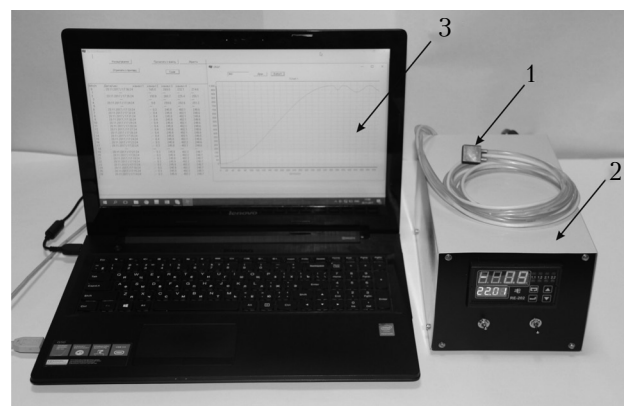


Fig. 1. Thermoelectric device with electronic control unit for the diagnostics of inflammatory processes in the human body:

1 – thermoelectric sensor of temperature and heat flux,
2 – electronic control unit, 3 – PC

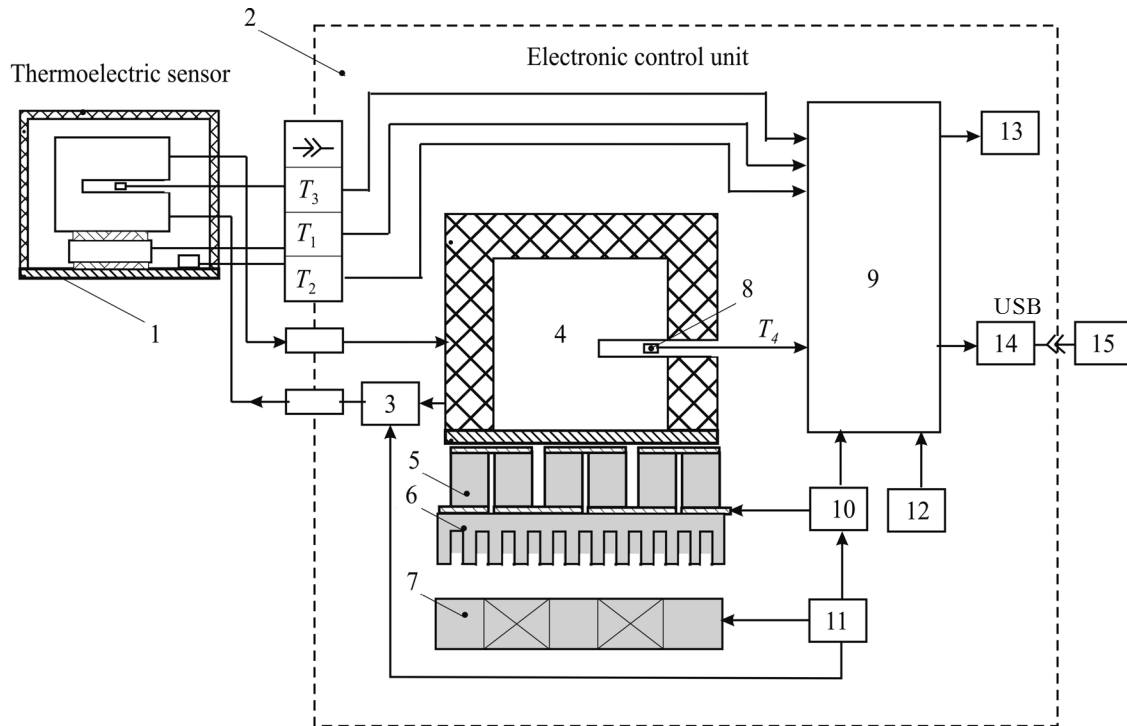


Fig. 2. Block diagram of the thermoelectric device:

1 – sensor with a thermostated free surface (**Fig. 3**); 2 – control unit; 3 – liquid pump; 4 – thermostat (150 ml) with a heat-conducting copper bottom; 5 – thermoelectric cooler (40×40×4 mm); 6 – air cooler; 7 – the fan; 8 – temperature sensor T_4 of liquid in thermostat (platinum microthermistor); 9 – measuring and master controllers of type RE-202; 10 – electronic commutator; 11 – power supply pump 3, fan 7 and cooler 5; 12 – power supply for measuring and master controllers 9; 13 – digital display; 14 – RS485/USB interface converter; 15 – personal computer

Technical characteristics of the device

Technical characteristics of the device	Parameters value
Temperature range of the thermoelectric sensor	+20...+40°C
Discreteness of setting and measuring of the temperature	0.01°C
The thermostat temperature setting error	± 0.01°C
Temperature measurement error	±0.5°C
The range of measuring the density of the heat flux	0.1 – 500 mW/cm ²
The density of the heat flux measuring error	±5%
Measurement speed	10 – 20 sec
AC power supply 50 Hz	220 V
Power (at a power supply of ~ 220 V)	10 W
Power supply from a DC source	12 V
Power (at 12 V power supply)	40 W
Number of thermoelectric sensors	1
Overall dimensions of the thermoelectric sensor	20×20×10 mm
Overall dimensions of the electronic control unit	260×160×120 mm
Time to reach operating mode	30 min
Length of hoses and cables	2 m
Weight of the device	3 kg

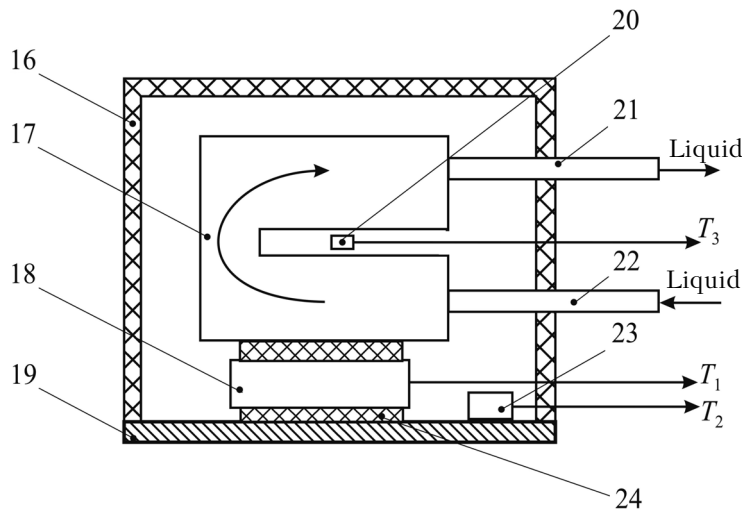


Fig. 3. Block diagram of a temperature and heat flux thermoelectric sensor:

16 – ebonite insulating jacket; 17 – copper liquid radiator (15×15×6 mm); 18 – thermoelectric sensor (10×10×2.4 mm); 19 – copper base of the sensor (thickness 0.3 mm); 20 – sensor of copper radiator temperature T_3 ; 21, 22 – inlet and outlet fittings (Ø4 mm); 23 – sensor of copper base temperature T_2 ; 24 – layer of heat-conducting paste

The device consists of two main functional units: a thermoelectric temperature and heat flux sensor 1 with a thermostated free surface and an electronic control unit 2. On the front panel of the electronic control unit there are measuring and driving controllers of the PE-202 type with a digital display, as well as “Network” and “Thermostat” toggle switches. The rear panel contains a thermoelectric sensor connector, thermoelectric sensor hose connections, 12 V battery terminals, a 220 V connection and a USB connector.

Principle of operation of the device

The device converts the heat flux and human body temperature into equivalent electric signals by means of a thermoelectric sensor; those signals being shown at the digital display of the electronic control unit in units of heat flux density (mW/cm^2) and temperature ($^{\circ}\text{C}$).

The proposed device works as follows. After placing the thermoelectric temperature and heat flux sensor on the object under test and turning on the “Network” toggle switch, voltage from the power supply 12 is fed to the PE-202 measuring and driving controllers (Fig. 2). In this case, the first channel on the digital monitor shows the value of the heat flux q passing through the thermoelectric sensor, the second channel shows the temperature T_2 of the surface of the object being tested, the third channel shows the temperature T_3 of the copper radiator of the thermoelectric sensor, and the fourth channel shows the temperature T_4 of the liquid in the tank 4. The heat flux

from the tested object passes through the thermoelectric sensor and heats the copper radiator 17 (see Fig. 3), its temperature T_3 increases, while the EMF of the thermoelectric sensor 18 decreases and, accordingly, the heat flux decreases. The amount of heat flux will also vary with the temperature of the environment. To eliminate the dependence of the heat flux on internal and external temperature, a thermostat 4 is provided in the schematic (see Fig. 2) which is turned on with the “Thermostat” toggle switch along with a liquid pump 3 and a fan 7, and through an electronic switch 10 voltage is applied to the TEC 5. The values of the temperature sensor 23 readings are compared with those of the set temperature T_{set} , which is preset in PE-202. The uncoordinated signal controls the value and direction of the current of the electronic switch 10 in such a way that the TEC 5 stabilizes the

liquid temperature with the accuracy of $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$. The liquid pump 3 pumps the circulating liquid through the copper radiator 17 and its temperature is also stabilized with the accuracy of $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ for the entire thermostat operation period. With such a temperature stability of the radiator 17, the heat flux will also be stable and will be determined only by the value of the heat flux from the object under study.

If necessary, one can record all the measured values in the internal memory of the device, and then, connecting the PC and using a computer programme, read the results of the measurement and build the corresponding graphs of the dependencies of these values on time, and also make the necessary calculations with the help of the developed computer programme.

Conclusions

A thermoelectric device with an electronic control unit for diagnosing the inflammatory processes in the human body proposed in this study has the ability to store, process and visualize the measurement results on the display of the device and a personal computer in real time. The developed design of a thermoelectric temperature and heat flux sensor with a thermostated free surface excludes the effect of the ambient temperature on the sensor readings.

The proposed device is intended for monitoring the temperature and thermal state of a human body in the real time, which is of vital importance for diagnosing inflammatory processes and various diseases at the early stages.

REFERENCES

1. https://www.newport.com/medias/sys_master/images/h3b/hb5/8796989751326/1936-R-2936-R-Power-and-Energy-Meter-Datasheet.pdf.
2. https://www.photonics.byu.edu/pm1835.parts/MODELS_1835-C_&_e2876.pdf.
3. http://www.mhzelectronics.com/ebay/manuals/thorlabs_pm320e_power_&_energy_meter_manual.pdf.
4. Ladyka R.B., Moskal D.N., Didukh V.D. [Semiconductor heat flux meters in the diagnostics and treatment of arthropathy]. *Meditsinskaya tekhnika*, 1992, vol. 6, pp. 34-35 [Rus].
5. Ladyka R.B., Dakaliuk O.N., Bulat L.P., Miagkota A.P. [Use of semiconductor heat flux meters in diagnostics and treatment]. *Meditsinskaya tekhnika*, 1996, vol. 6, pp. 36-37. [Rus]
6. Demchuk B.M., Kushneryk L.Ya., Rublenyk I.M. [Thermoelectric sensors for orthopedics]. *Termoelektryka*, 2002, vol. 4, pp. 80-85. [Ukr]
7. Patent of Ukraine 53104. Sensor for preliminary diagnostics of inflammatory processes in mammary glands. A. Ashcheulov A.A., Klepikovskiy A.V., Kushneryk L.Ya., Rarenko A.I., Cherchenko V.I., 2003. [Ukr]
8. Ashcheulov A.A., Kushneryk L.Ya. [Thermoelectric device for biomedical instant diagnosis]. *Technologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2004, vol. 4, pp. 38-39. [Rus]
9. Anatychuk L.I. *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva. Spravochnik* [Thermoelements and thermoelectric devices. Handbook]. Kyiv, Naukova dumka, 1979. [Rus]
10. Anatychuk L.I., Lozinskii N.G., Mikitiuk P.D., Rozver Yu.Yu. [Thermoelectric semiconductor heat flux meter]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1983, vol. 5, p. 236. [Rus]
11. Anatychuk L.I., Bulat L.P., Gutsal D.D., Miagkota A.P. [Thermoelectric heat flux meter]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1989, vol. 4, p. 248 [Rus]
12. Anatychuk L.I., Kobylanskyi R.R., Konstantynovych I.A. [Calibration of thermoelectric heat flux sensors]. *Proc. of XV International Scientific and Practical Conference "Modern information and electronic technologies"*, Odessa, Ukraine, 2014, pp. 30-31. [Ukr]
13. Kobylanskyi R.R., Boichuk V.V. [The use of thermoelectric heat flux meters in medical diagnostics]. *Naukovy visnyk Chernivetskogo universitetu: zbirnyk naukovykh prats. Fizyka. Elektronika*, 2015, vol. 1, iss. 1, pp. 90-96. [Ukr]
14. Anatychuk L.I., Kobylanskyi R.R., Konstantynovych I.A., Lysko V.V., Pugantseva O.V., Rozver Yu.Yu., et al. [Calibration bench for thermoelectric heat flux sensors]. *Termoelektryka*, 2016, vol. 5, pp. 71-79. [Ukr]
15. Anatychuk L.I., Kobylanskyi R.R., Konstantynovych I.A., Kuz R.V., Manik O.M., Nitsovych O.V., et al. [Technology for manufacturing thermoelectric microthermopiles]. *Termoelektryka*, 2016, vol. 6, pp. 49-54. [Ukr]
16. Gischuk V.S. [Electronic recorder of signals from human heat flux sensors]. *Termoelektryka*, 2012, vol. 4, pp. 105-108. [Ukr]
17. Gischuk V.S. [Electronic recorder with processing signals from thermoelectric heat flux sensor]. *Termoelektryka*, 2013, vol. 1, pp. 82-86. [Ukr]
18. Gischuk V.S. [Modernized device for human heat flux measurement]. *Termoelektryka*, 2013, vol. 2, pp. 91-95. [Ukr]
19. Anatychuk L.I., Ivashchuk O.I., Kobylanskyi R.R., Postevka I.D., Bodiaka V.Yu., Hushul I.Ya. [Thermoelectric device for temperature and heat flux density measurement "ALTEC-10008"]. *Termoelektryka*, 2016, vol. 1, pp. 76-84. [Ukr]
20. Anatychuk L.I., Yuryk O.E., Kobylanskyi R.R., Roi I.V., Fishchenko Ya.V., Slobodianiuk N.P., et al. [Thermoelectric device for the diagnosis of inflammatory processes and neurological manifestations of vertebral osteochondrosis]. *Termoelektryka*, 2017, vol. 3, pp. 89-102. [Ukr]

Received 24.11 2017

Акад. НАНУ, д. ф.-м. н. Л. І. АНАТИЧУК^{1,2}, к. ф.-м. н. Р. Р. КОБИЛЯНСЬКИЙ^{1,2},
д. ф.-м. н. Р. Г. ЧЕРКЕЗ², к. ф.-м. н. І. А. КОНСТАНТИНОВИЧ²,
В. І. ГОШОВСЬКИЙ³, В. А. ТЮМЕНЦЕВ²

Україна, м. Чернівці, ¹Інститут термоелектрики НАН та МОН України,

²Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича;

м. Львів, ³ДНВП «Термоприлад-3»

E-mail: romakobylanskyi@ukr.net

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРИЛАД З ЕЛЕКТРОННИМ БЛОКОМ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ЗАПАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ОРГАНІЗМУ ЛЮДИНИ

Представлено термоелектричний прилад, здатний одночасно вимірювати температуру і густину теплових потоків поверхні тіла людини за допомогою розробленого термоелектричного сенсора з термостатованою вільною поверхнею, що виключає вплив температури оточуючого середовища на покази сенсора. Розроблено спеціальну комп'ютерну програму для обробки результатів вимірювань, їх накопичення і відтворення у заданому вигляді на персональному комп'ютері, що дає можливість здійснювати моніторинг температурного та теплового стану людини у реальному часі. Наведено особливості конструкції приладу та його технічні характеристики.

Ключові слова: термоелектричний прилад, електронний блок керування, сенсор температури і теплового потоку, запальні процеси організму людини.

DOI: 10.15222/ТКЕА2017.6.44
УДК 537.32

Акад. НАНУ, д. ф.-м. н. Л. И. АНАТЫЧУК^{1,2},
к. ф.-м. н. Р. Р. КОБЫЛЯНСКИЙ^{1,2}, д. ф.-м. н. Р. Г. ЧЕРКЕЗ²,
к. ф.-м. н. И. А. КОНСТАНТИНОВИЧ², В. И. ГОШОВСКИЙ³,
В. А. ТЮМЕНЦЕВ²

Украина, г. Черновцы, ¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
²Черновецкий национальный университет им. Ю. Федьковича;
г. Львов, ³ГНПП «Термоприбор-З»
E-mail: romakobylianskyi@ukr.net

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИБОР С ЭЛЕКТРОННЫМ БЛОКОМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ВОСПАЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА

Представлен термоэлектрический прибор, способный одновременно измерять температуру и плотность тепловых потоков поверхности тела человека с помощью разработанного термоэлектрического датчика с термостатированной свободной поверхностью, исключаяющей воздействие температуры окружающей среды на показания сенсора. Разработана компьютерная программа для обработки результатов измерений, их накопления и воспроизведения в заданном виде на персональном компьютере, что позволяет осуществлять мониторинг температурного и теплового состояния человека в реальном времени. Приведены особенности конструкции прибора и его технические характеристики.

Ключевые слова: термоэлектрический прибор, электронный блок управления, сенсор температуры и теплового потока, воспалительные процессы организма человека.

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

Горох Геннадий Георгиевич, канд. техн. наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

Добровольский Юрий Георгиевич, докт. техн. наук, доцент, Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича

Круковский Семен Иванович, докт. техн. наук, начальник отдела, НПП «Электрон-Карат», г. Львов

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

Пудов Алексей Олегович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Харьковский физико-технический институт

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

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

Трофимов Владимир Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет

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

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

3. Все поступающие к рассмотрению материалы проходят двухстороннее закрытое рецензирование.

4. При обнаружении плагиата или фальсификации результатов статья отклоняется.

5. Редакция не вносит плату за опубликование рукописи и не выплачивает авторский гонорар.

6. Обязательным условием для принятия статьи к печати является ее соответствие общепринятым нормам построения научной публикации (подробнее см. на сайте журнала).

7. Статья должна быть четко структурирована, а поставленная задача, выводы и название – согласованы между собой.

8. При написании статьи следует обратить внимание на следующее:

– название рукописи должно быть конкретным, информативным и в то же время по возможности кратким;

– аннотация должна быть достаточно лаконичной (от 50 до 100 слов) и в то же время информативной, соответствовать содержанию статьи и показывать, что сделано в работе;

– ключевые слова должны быть подобраны так, чтобы вероятность нахождения статьи через поисковые системы была как можно выше;

– описание результатов, представленных на рисунках, должно включать в себя интерпретацию этой информации, а не сводиться к дублированию подписей или к простому описанию приведенных зависимостей. Например, вместо таких неинформативных фраз, как «На рис. 1 приведен график зависимости A от B . Из рисунка видно, что при возрастании B значение A монотонно уменьшается.», следует дать пояснение типа «Как видно из рис. 1, при возрастании B значение A монотонно уменьшается, что свидетельствует о том, что ...»;

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

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

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

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

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

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

13. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а терминология соответствовать общепринятой. Все использованные символы и аббревиатуры нужно пояснить при первом их упоминании в тексте.

14. С точки зрения удобства верстки желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% от общего объема статьи.

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

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

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

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

ДЕВЯТНАДЦАТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

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

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

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



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

Пишите
Подписывайтесь
Читайте