

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

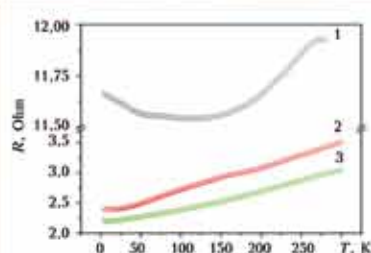


Fig. 1. Temperature dependence of the resistance of deformed InSb samples with different the concentration of charge carriers in the vicinity of the metal dielectric transition (in cm^{-3}):
1 – $6 \cdot 10^{16}$; 2 – $2 \cdot 10^{17}$; 3 – $6 \cdot 10^{17}$

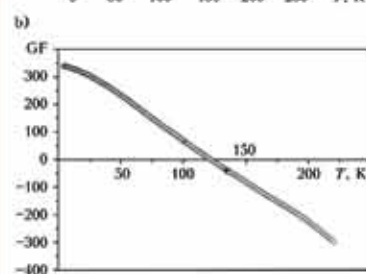
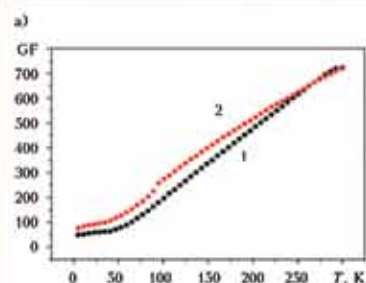


Fig. 2. Temperature dependence of the gauge factor for InSb microcrystals with different the concentration of charge carriers (in cm^{-3}):
a) 1 – $2 \cdot 10^{17}$; 2 – $6 \cdot 10^{17}$; б) $6 \cdot 10^{16}$

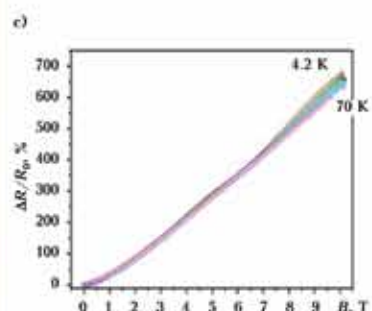
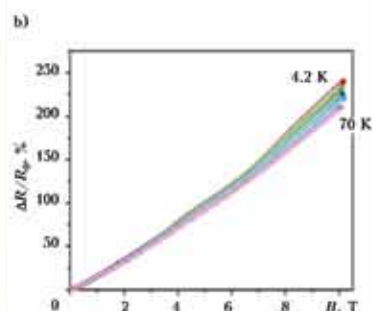
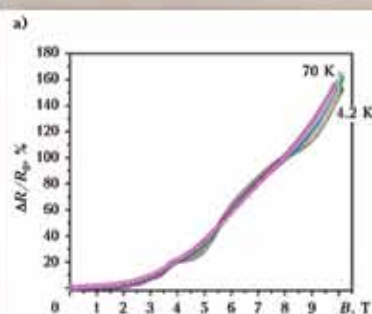


Fig. 3. Transversal magnetoresistance of InSb whiskers with different tin concentration (in cm^{-3}) for strained samples at temperature range 4.2–70 K:
a – $6 \cdot 10^{16}$; б – $6 \cdot 10^{17}$; c – $2 \cdot 10^{17}$

До статті
«Deformation-induced
effects in indium antimonide
microstructures at cryogenic
temperatures for sensor
applications»

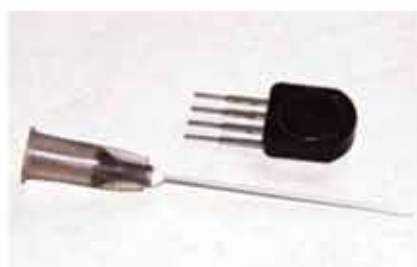


Fig. 4. Typical view of sensors of physical quantities

3–4 2019

МАЙ — АВГУСТ

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

ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К. т. н. А. Ф. Бондаренко
(КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Акад. НАНУ, д. ф.-м. н. А. Е. Беяев (г. Киев, Украина)
Д. т. н. Н. М. Вакив (г. Львов, Украина)
Д. т. н. Г. А. Оборский (г. Одесса, Украина)
К. т. н. В. М. Чмилъ В. (г. Киев, Украина)
Е. А. Тихонова (г. Одесса, Украина)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д. т. н. С. Г. Антошук (г. Одесса, Украина)
Д. т. н. А. П. Бондарев (г. Львов, Украина)
Prof. I. Vajda (Budapest, Hungary)
Prof. D. Vinnikov (Tallinn, Estonia)
Prof. I. Galkin (Riga, Latvia)

К. т. н. Э. Н. Глушеченко (г. Киев, Украина),
зам. главного редактора
К. т. н. Г. Г. Горох (г. Минск, Республика Беларусь)
Prof. K. Dhoska (Tirana, Albania)

Д. ф.-м. н. В. В. Должиков (г. Харьков, Украина)
Д. т. н. А. А. Дружинин (г. Львов, Украина)
Д. т. н. А. А. Ефименко (г. Одесса, Украина),
зам. главного редактора

Д. ф.-м. н. Д. В. Корбушак (г. Киев, Украина)
Д. т. н. С. И. Круковский (г. Львов, Украина)
Чл.-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. В. С. Лысенко (г. Киев, Украина)
Prof. J. Martins (Sapareica, Portugal)

Д. т. н. И. Ш. Невлюгов (г. Харьков, Украина)
Dr. Sc. D. Nika (Chisinau, Moldova)

Д. т. н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев, Украина)
Prof. V. Pires (Setúbal, Portugal)

Д. ф.-м. н. С. В. Плаксин (г. Днепропетровск, Украина)

К. т. н. Прокорец В. М. (г. Киев, Украина)
Prof. E. Romero-Cadaval (Badajoz, Spain)

К. ф.-м. н. А. В. Рыбка (г. Харьков, Украина)
К. т. н. П. С. Сафронов (г. Одесса, Украина),

отв. секретарь редколлегии

Д. т. н. В. Н. Сигорец (г. Киев, Украина)
Д. т. н. В. С. Ситников (г. Одесса, Украина)

Dr. Sc. Z. Stević (Belgrade, Serbia)

Д. х. н. В. Н. Томашик (г. Киев, Украина)

К. т. н. В. Е. Трофимов (г. Одесса, Украина)

Подписка на журнал

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

В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.

Контактная информация

Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17;
tkea.journal@gmail.com, www.tkea.com.ua,
+38 099 444 63 52.

Редакция

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

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

Реферируется
в УРЖ «Джерело»
(г. Киев)

Журнал включен
в международную справочную
систему по периодическим
и продолжающимся изданиям
“Ulrich’s Periodicals Directory”
(США),
в международную систему
библиографических ссылок
CrossRef,
в наукометрическую базу РИНЦ,
в базу данных DOAJ,
в Google Scholar

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

Одобрено к печати
Ученым советом ОНПУ
(Протокол № 2 от 24.09 2019 г.)
Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Деформационно-стимулированные эффекты в микро-
структурах антимонида индия при криогенных
температурах для сенсорных применений. *А. А.
Дружинин, Ю. Н. Ховерко, И. П. Островский,
Н. С. Лях-Кагуй, Е. А. Пасынкова* (на английском) 3

Электронные средства: исследования, разработки

Уменьшение шумов и помех путем рационального
выбора электронных компонентов в каналах с
сосредоточенными параметрами при высокоско-
ростной обработке данных. *А. Н. Тыныныка* 10

Энергетическая электроника

Изменения характеристик кремниевых фотоэлек-
трических преобразователей солнечных батарей
после токовых перегрузок. *А. В. Иванченко, А. С.
Тонкошкур* 19

Сенсоэлектроника

Высокотемпературные датчики деформации на осно-
ве нитевидных кристаллов фосфида галлия. *А. О.
Дружинин, И. И. Марьямова, А. П. Кутраков* (на
украинском) 26

Метрология. Стандартизация

Поверхностные слои ZnSe:Ca с дырочной прово-
димостью. *В. П. Махний, М. М. Березовский,
О. В. Кинзерская, В. В. Мельник* (на английском) 31

Материалы электроники

Высокоинформативный комплексный метод опре-
деления типа моторного масла. *А. В. Мамыкин,
А. Л. Кукла, Л. М. Матвиенко, А. В. Дорожинская,
В. П. Маслов, Г. В. Дорожинский* 36

Рецензенты номера 44

Новые книги 25, 30

ЗМІСТ

Нові компоненти для електронної апаратури

Деформаційно-стимульовані ефекти в мікро-структурах антимоніду індію за криогенних температур для сенсорних застосувань. А. О. Дружинін, Ю. М. Ховерко, І. П. Островський, Н. С. Лях-Кагуй, О. А. Пасинкова (3)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Зменшення шумів і завад шляхом раціонального вибору електронних компонентів в каналах з зосередженими параметрами при високошвидкісній обробці даних. О. М. Тининика (10)

Енергетична електроніка

Зміни характеристик кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячних батарей після струмових перевантажень. О. В. Іванченко, О. С. Тонкошкур (19)

Сенсоелектроніка

Високотемпературні сенсори деформації на основі ниткоподібних кристалів фосфіду галію. А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, О. П. Кутраков (26)

Матеріали електроніки

Поверхневі шари ZnSe:Ca з дірковою провідністю. В. П. Махній, М. М. Березовський, О. В. Кінзерська, В. В. Мельник (31)

Метрологія. Стандартизація

Високоінформативний комплексний метод визначення типу моторного мастила. А. В. Мамикін, О. Л. Кукла, Л. М. Матвієнко, Г. В. Дорожинська, В. П. Маслов, Г. В. Дорожинський (36)

CONTENTS

New components for electronic equipment

Deformation-induced effects in indium antimonide microstructures at cryogenic temperatures for sensor applications A. O. Druzhinin, Yu. M. Khoverko, I. P. Ostrovskii, N. S. Liakh-Kaguy, O. A. Pasynkova (3)

Electronic devices: research, development

Reduction of noise and interference by rational selection of electronic components in lumped parameter channels at high speed data processing. A. N. Tynnyka (10)

Power electronics

Changes in the characteristics of silicon photovoltaic cells of solar arrays after current overloads. A. V. Ivanchenko, A. S. Tonkoshkur (19)

Sensors

High temperature strain sensors based on gallium phosphide whiskers. A. O. Druzhinin, I. I. Maryamova, O. P. Kutrakov (26)

Materials of electronics

Surface ZnSe:Ca layers with hole conductivity. V. P. Makhniy, M. M. Berezovskiy, O. V. Kinzerska, V. V. Melnyk (31)

Metrology, standardization

Highly informative integrated method for determining the type of engine oil. A. V. Mamykin, A. L. Kukla, L. M. Matvienko, H. V. Dorozinska, V. P. Maslov, G. V. Dorozinsky (36)

A. O. DRUZHININ^{1,2}, Yu. M. KHOVERKO^{1,2}, I. P. OSTROVSKII¹,
N. S. LIAKH-KAGUY¹, O. A. PASYNKOVA¹

Ukraine, ¹Lviv Polytechnic National University;

Poland, Wroclaw, ²Institute of Low Temperature and Structure Research PAS

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

DEFORMATION-INDUCED EFFECTS IN INDIUM ANTIMONIDE MICROSTRUCTURES AT CRYOGENIC TEMPERATURES FOR SENSOR APPLICATIONS

The authors investigate deformation-induced changes in the electrophysical parameters of the indium antimonide microcrystals at cryogenic temperatures in strong magnetic fields up to 10 T. It is determined that for strongly doped InSb microcrystals, the gauge factor at liquid-helium temperature is $GF_{4.2K} \approx 72$ for the charge carrier concentration of $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, while being $GF_{4.2K} \approx 47$ for the concentration of $6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, at $\varepsilon = -3 \cdot 10^{-4} \text{ rel. un.}$ For the development of magnetic field sensors based on the magnetoresistive principle, the effect of a giant magnetic resistivity reaching 720% at a temperature of 4.2 K is used.

Ключевые слова: InSb whiskers, gauge factor, magnetoresistance, sensor.

Despite the rapid progress and significant advances in microelectronics, there remain a lot of problems that require further detailed study of the physical properties and possible applications of whisker crystals. Modern cryogenic electronics requires highly sensitive, high-speed devices and components of integrated circuits, capable of operating at various temperature intervals, including the cryogenic temperature range. Principles of cryoelectronics are used to build a number of devices (cryotrons, quantum and parametric amplifiers, resonators, filters, sensors, delay lines, etc.) based on silicon technologies [1]. On the other hand, apart from using traditional silicon whisker crystals in modern microelectronics, scientists carry on intensive studies of other materials and structures. For instance, there is an ongoing work on creating solid state electronics based on silicon-on-insulator structures [2]. Using polycrystalline silicon in manufacturing of microelectronic devices makes it possible to create multilayer structures. One of the advantages of such structures is that the resistivity of the created layers varies within a very wide range (several orders of magnitude).

However, the need for deep cooling and related technological difficulties considerably restrict the use of such materials. Moreover, one of the most important areas of modern magnetoelectronics is the study of the magnetoresistive effect (**MR**), and in recent years the emphasis has been placed on the phenomenon of giant magnetoresistance (**GMR**). In the developed devices [1], in which there are new effects due to the interaction of «magnetic electrons» with artificially created nanosized structures, a combination of magnetism and electronics

is used, so they claim the birth of a new area of magnetism and technology — magnetoelectronics. In this case, InSb whisker crystals, due to their morphology, high values of charge carrier mobility, structural perfection and high mechanical strength, are a good model for studying the influence of external factors, in particular magnetic field, for the concentrations corresponding to the metal-semiconductor transition [3].

It is known that film materials using the magnetoresistive effect, are sensitive to the electric current. Therefore, by changing the value of the current one can change the amplitude of the magnetoresistance. Thus, the authors of [4] established the dependence of the magnetoresistance of multi-layer materials based on Co, Ni or Pt on the measuring current value. The obtained results are explained [5] by the different effect of the torque moment transfer by spin-polarized charge carriers at different values of current. This effect was anticipated by the authors of [6, 7] and experimentally studied in [8–10].

On the other hand, the authors of [11, 12] studied the manifestation of the magnetoresistive effect in semiconductor-dispersed magnets. Here, however, the magnetoresistance did not reach high values (as opposed to InSb), which directly affects the sensitivity of the devices developed on their basis.

Previous studies conducted for InSb microcrystals at cryogenic temperatures in strong magnetic fields up to 14 T allowed detecting a number of effects and to assess a number of electrophysical parameters such as Shubnikov — de Haas (SdH) oscillations (and their period) [13] and Dingle

temperature [3], to detect GMR and negative magnetoresistance, associated with significant spin-orbital exchange interaction.

Moreover, the influence of external factors, such as deformation, allowed to determine the occurrence of the Berry phase [14] in the longitudinal magnetoresistance, which was previously observed by the authors of [15–17] in bismuth. It is obvious that the deformation leads to a change in the scattering mechanisms, and may also affect electrophysical parameters in the transverse magnetoresistance, in particular the GMR value.

The authors of this work aimed at studying the deformation-induced changes in the electrophysical parameters of the indium antimonide microcrystals at the cryogenic temperatures in strong magnetic fields up to 10 T, particularly in the transverse magnetoresistance, in order to investigate the possibilities of using such crystals in the magnetoresistive sensors of deformation and magnetic field, which could be used under difficult operating conditions.

Experiment details

In order for the InSb whisker crystals to grow, i.e., for the material to be transferred to the crystallization zone, it was necessary to create a concentration gradient. This was achieved by creating a temperature gradient between the dissolution zone and the crystallization zone.

The whisker crystallization temperature was 720 K, while the evaporation zone temperature was 850 K. While growing, the crystals were doped with tin admixture, and the concentration of charge carriers, determined by using Hall effect, was from $6 \cdot 10^{16}$ to $6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. The chosen InSb whiskers were 2–3 mm in length and had lateral dimensions of about 30–40 μm . Gold microwires (10 microns in diameter) were pulse-welded to the InSb micro-crystal to create eutectic contacts.

InSb whisker conductivity was studied in the temperature range from 4.2 to 300 K. For these studies, crystals were cooled down to the temperature of 4.2 K in a helium cryostat. The temperature was measured by using a Cu–CuFe thermocouple, calibrated with a CERNOX sensor.

The magnetic field effects of the whiskers were studied using a Bitter magnet with the induction of up to 14 T and the time scanning of field of 1.75 T/min in the temperature range of 4.2–77 K. Stabilized electric current along the whisker was created by the current source Keithley 224 in the range of 1–10 mA, depending on the resistance of the crystal. CERNOX sensor was used to measure magnetic parameters. Being weakly sensitive to magnetic field induction B , the device has a variation of the output signal of about 1% at $B = 15 \text{ T}$.

In order to evaluate the possibility of using InSb microcrystals in mechanical sensors, the authors used a technique of deforming the samples by producing a difference between the linear expansion coefficients of the crystal itself and the substrate on which it was fixed [18]. The uniaxial deformation of microcrystals was carried out by affixing the crystals on the substrates with HL-931 glue with a polymerization temperature of 180°C. According to this method, when the crystal is fixed on the substrate, the thermal stress in the former can be estimated by the ratio

$$\sigma_t(T) = \frac{1}{t_c} \int_{T_0}^T \frac{\alpha_s(T) - \alpha_c(T)}{\frac{1 - \nu_s(T)}{E_s(T)t_s} + \frac{1 - \nu_c(T)}{E_c(T)t_c}} dt, \quad (1)$$

where α_c and α_s are temperature coefficients of linear expansion of the crystal and substrate, respectively;

E_c , E_s and ν_c , ν_s are Young's moduli and Poisson coefficients of crystal and substrate materials, respectively;

t_c and t_s are the thickness of the crystal and the substrate.

Parameter T_0 in this formula corresponds to the technological temperature at which a rigid connection is formed between the crystal and the substrate, e.g., this may be the temperature of adhesive polymerization.

To calculate the thermal deformation of the whiskers, the authors used the temperature dependences of the thermal expansion coefficients and of Young's moduli for InSb and Cu from [19–21].

Assuming that the elastic coefficients depend on temperature slightly in the temperature range of 4.2–50 K, we can bring the formula (1) to the following form:

$$\varepsilon_t(T) = \gamma \int_{T_0}^T [\alpha_s(T) - \alpha_c(T)] dt, \quad (2)$$

where γ is the coefficient that characterizes the efficiency of the transmission of deformation from the substrate to the crystal, its value depending on the geometry of the samples and the methods of their fixation. In our case, the value of γ is calculated according to [18] and is equal to 0.7.

Experimental results

The use of semiconductor sensors based on the piezoresistive effect remains the most common means for converting mechanical quantities into an electrical signal due to the high sensitivity and reliability of the design [18]. Therefore, the focus of the experimental studies of InSb semiconductor crystals at temperatures of 4.2–300 K in strong magnetic fields (up to 14 T)

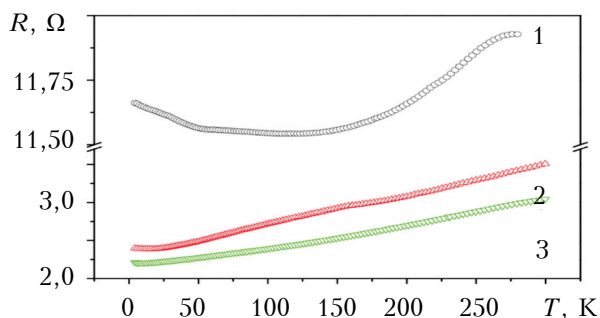


Fig. 1. Temperature dependence of the resistance of deformed InSb samples with different concentration of charge carriers in the vicinity of the metal dielectric transition (in cm^{-3}):

1 – $6 \cdot 10^{16}$; 2 – $2 \cdot 10^{17}$; 3 – $6 \cdot 10^{17}$

was on determining exactly how the deformation affected the samples. Thus, **Fig. 1** shows the temperature dependence of the resistance of microcrystals fixed on copper substrates with an average deformation level $\varepsilon = -3 \cdot 10^{-4}$ rel. un. in the temperature range from 4.2 to 300 K.

Preliminary studies [3, 13] for free (not fixed) InSb whiskers allowed estimating the gauge factor (GF) at low temperatures, which can be determined by the ratio

$$GF = \frac{R - R_0}{R_0 \varepsilon}, \quad (3)$$

where R_0 is the resistance of the undeformed (free) crystal;

R is the resistance of the deformed crystal;

ε is the uniaxial strain acting on the crystal.

Fig. 2 presents the temperature dependences of the gauge factor for these crystals calculated from the experimental data. Throughout the entire studied temperature range, strongly doped crystals (**Fig. 1**) demonstrate the temperature dependence of resistance that is typical for metal. Piezoresistance manifests itself typically in these crystals [22]: when subjected to compression deformation, the resistance of the crystals decreases.

At the temperature of liquid helium, $GF_{4.2\text{K}} \approx 72$ for InSb microcrystals with a concentration of $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ and $GF_{4.2\text{K}} \approx 47$ for the crystals with a concentration of $6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, at $\varepsilon = -3 \cdot 10^{-4}$ rel. un. However, for InSb microcrystals with a concentration of $6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, gauge factor exhibits non-typical properties: above the temperature of the liquid nitrogen, it changes its sign from positive to negative. The absolute value of the gauge factor both at the temperature of liquid helium and in the area of room temperatures reaches $GF \approx 350$, which can be explained by the fact that the charge carrier concentration approaches the values of the

dielectric state of the metal – dielectric phase transition. Apparently, this is caused by the fact that the ensemble of charge carriers at low temperatures becomes reduced, because the carriers are being freed out, and their transport is believed to be caused by strong spin-orbit interaction in the range of jump conductivity by twice localized impurities [3, 13, 23].

Investigation of the behavior of the magnetic resistivity at low temperatures can also help understand the processes occurring in crystals at low temperatures. Thus, the authors of [3] noticed that magnetoresistance changes its sign from positive to negative in the longitudinal direction, which indicates a characteristic feature of the studied samples. Another such feature was described in [24]: magnetoresistance deviated from the quadratic dependence in the range of relatively weak magnetic fields.

The authors of [24] explained the emergence of a negative magnetic resistivity by the formation of «pairs», i.e., two states with paired spins, that are relatively close to each other and distant from others, which exist near the Fermi level.

In addition, the authors of both [3] and [25] received high values of Lande g -factor ($g \approx 60$) at a temperature of 4.2 K, indicating a strong spin-orbit interaction.

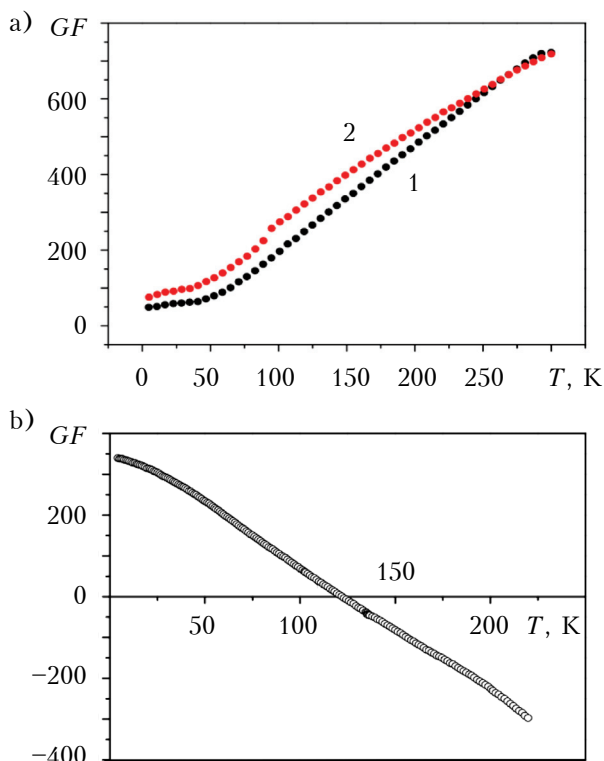


Fig. 2. Temperature dependence of the gauge factor for InSb microcrystals with different concentration of charge carriers (in cm^{-3}):

a) 1 – $2 \cdot 10^{17}$; 2 – $6 \cdot 10^{17}$; b) $6 \cdot 10^{16}$

In its turn, the deformation leads to the redistribution of energy zones and to the manifestation of the negative magnetic resistivity effect, associated with a change in the density of states near the Fermi level in the magnetic field. If the «pair» is ionized once, its level is shifted upward when the magnetic field increases. Some of the levels shift downward, and others shift upwards, which leads not only to the displacement of the Fermi level, but also to the change in the density of states in its vicinity.

The authors of [13, 17] demonstrated that if the chemical potential is equal to or lies slightly below the second subband, then the increase of the magnetic field B and the movement of the charge carriers in the boundary zones cause the chemical potential to shift, and due to this fact, the resistance first drops sharply and then monotonously grows. This is connected to the competing influence of the magnetic field on the magnitude of the multiplier and the index in the expression of the carrier dispersion probability at the Fermi level.

Fig. 3, a shows the experimental results on the transverse magnetoresistance for deformed crystals with a charge carrier concentration of $6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (which corresponds to the dielectric state of the metal – dielectric phase transition). The figure demonstrates that the deformation causes changes in the conduction mechanisms inside the crystals, which is reflected in the anomalous behavior of the gauge factor. Thus, at low temperatures, Shubnikov de Haas oscillations begin to manifest themselves in InSb crystals for the transverse magnetoresistance, same as they do for the longitudinal magnetoresistance.

For the deformed InSb microstructures with a charge carrier concentration of $6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (which corresponds to the metal state of the metal – dielectric phase transition), the magnetoresistance significantly increases, reaching 250% (Fig. 3, b).

The probable reason for the growth of the magnetoresistance in such crystals is, obviously, the release of «frozen-out» excess charge carriers due to an increase in their mean concentration in the crystal, and, consequently, an increase in average mobility. This leads to the linearization of the characteristics and a decrease of the temperature coefficient of resistance of crystals in the 4.2–70 K range.

On the other hand, in the deformed InSb microcrystals with the charge carrier concentration of $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (which corresponds to the metal–dielectric phase transition), a giant magnetic resistance was also observed, as well as its significant increase in value (Fig. 3, c), reaching 720%. In this case, however, the values of the temperature magnetoresistivity coefficient were lower for the temperature range of 4.2–70 K, which increases the sensitivity to the magnetic field.

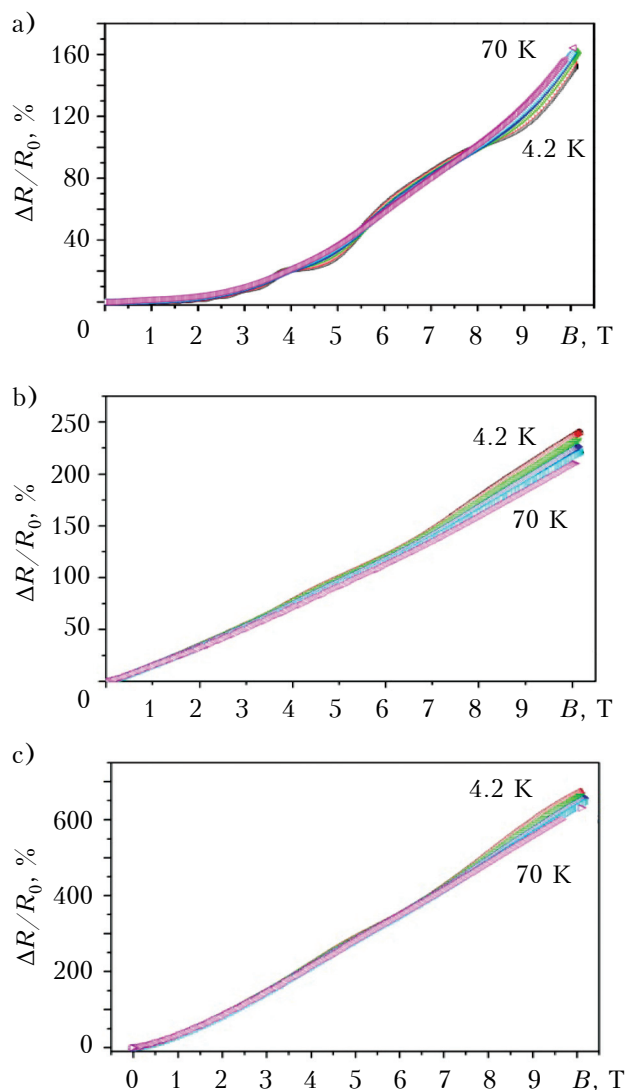


Fig. 3. Transversal magnetoresistance of InSb whiskers with different tin concentration (in cm^{-3}) for strained samples at temperature range 4.2–70 K:

a – $6 \cdot 10^{16}$; b – $6 \cdot 10^{17}$; c – $2 \cdot 10^{17}$

Application

The present stage of the development of new branches of science and technology (space and aviation technology, cryogenic technology, cryoenergy, etc.) highlights the problem of creating miniature highly sensitive mechanical, thermal, and magnetic sensors with a special capacity to operate at low temperatures [26–31].

The studies on the influence of deformation and magnetic field on indium antimonide microcrystals with a charge carrier concentration from $6 \cdot 10^{16}$ to $6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ allowed identifying a number of effects that make such materials suitable for use as basis for the piezoresistive sensors and magnetic field magnetoresistive sensors.

A photo of a standard physical quantity sensor, developed during this study, is shown in **Fig. 4**.

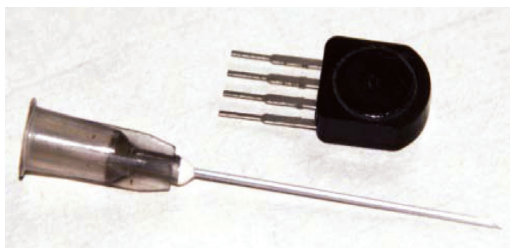


Fig. 4. Typical view of sensors of physical quantities

The temperature coefficient of resistance (**TCR**) for such microcrystals was found to be $TCR \approx 0.004 \Omega/K$ (Fig. 1, curves 2, 3) at room temperature (Fig. 2, *a*). Such samples can be used to create mechanical sensors for two temperature ranges: from 4.2 to 50 K and from 50 to 300 K, since there is a significant increase in $GF_{300K} \approx 720$ at room temperature (Fig. 2, *a*).

For InSb crystals with a charge carrier concentration corresponding to the dielectric state of the metal–dielectric phase transition, the gauge factor is $GF_{4.2K} \approx 350$ and $GF_{300K} \approx -350$. The temperature coefficient of resistance of such samples is slightly lower ($TCR \approx 0.001 \Omega/K$). The temperature-related change in the gauge factor is linear (Fig. 2, *b*). Such samples can be used to create piezoresistive sensors for a wide range of temperatures.

The research on the magnetoresistance of deformed InSb microcrystals with a charge carrier concentration from $6 \cdot 10^{16}$ to $6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (covering the metal–dielectric phase transition) at cryogenic temperatures showed the following. The samples with a charge carrier concentration of $6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ showed an instability of the temperature coefficient of the magnetoresistance in the range of 4.2–70 K, caused by oscillation phenomena occurring in the transverse magnetoresistance in magnetic fields up to 10 T. Such phenomena make it impossible to use deformed InSb microcrystals in magnetic field sensors at cryogenic temperatures. The deformed InSb crystals with a concentration of charge carriers of $6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ demonstrated a significant increase in the magnetic resistance (up to 250%) at a sensitivity of 600 mV/T. The temperature resistance (magnetic resistivity) for the temperature range of 4.2–70 K in the fields up to 10 T was $TCR \approx 0.57 \Omega/K$ (Fig. 3, *b*). As for the deformed InSb crystals with the charge carrier concentration of $6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (which corresponds to the metal–dielectric transition), there was detected the giant magnetoresistance (which increased up to 720%). The sensitivity to the magnetic field here was 1500 mV/T. The temperature coefficient of resistance for the temperature range of 4.2–70 K in the fields up to 10 T was $TCR \approx 0.46 \Omega/K$ (Fig. 3, *c*).

Conclusions

The studies on the influence of deformation on the electrophysical parameters of indium antimonide microcrystals at cryogenic temperatures in strong magnetic fields (up to 10 T) allowed discovering a number of effects that make such materials suitable for use as basis for the magnetoresistive sensors of deformation and magnetic field, that could function under complex operating conditions.

It has been determined that the best option for piezoresistive sensors that could function in a wide temperature range (4.2–300 K) are the InSb microcrystals with carrier concentration of $6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (which corresponds to the dielectric state of the metal–dielectric transition).

Magnetic field sensors based on magnetoresistive principle were developed using the giant magnetic resistivity effect reaching 720% at a temperature of 4.2 K. Such sensors contain deformed InSb microcrystals with a carrier concentration corresponding to the metal–dielectric transition ($2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$). The developed microelectronic sensor has ultra-high sensitivity to a magnetic field of 1500 mV/T, and the simplicity of its design provides low inertia and high performance at the same time.

REFERENCES

1. Zutic I., Fabian Ja., Das Sarma S. Spintronics: Fundamentals and applications. *Rev. Mod. Phys.*, 2004, vol. 76, iss. 2, 323. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.76.323>
2. Holota V.I., Kogut I., Druzhinin A., Khoverko Y. High sensitive active MOS photodetector on the local 3D SOI-structure. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 854, pp. 45–47. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.854.45>
3. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Liakh-Kaguy N. Negative magnetoresistance in indium antimonide whiskers doped with tin. *Low Temperature Physics*, 2016, vol. 42, pp. 453–457. <https://doi.org/10.1063/1.4954778>
4. Nepijko S.A., Kutnyakhov D., Odnodvoret L.V., Protchenko S.I. Sensor and microelectronic elements based on nanoscale granular systems. *J. Nanopart. Res.*, 2011, vol. 13, iss. 12, p. 6263–6281. <https://doi.org/10.1007/s11051-011-0560-3>
5. Mangin S., Ravelosona D., Katine J.A. et al. Current-induced magnetization reversal in nanopillars with perpendicular anisotropy. *Nat. Mater.*, 2006, no. 5, pp. 210–215. <https://doi.org/10.1038/nmat1595>
6. Berger L. Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current. *Phys. Rev. B*, 1996, vol. 54, iss. 13, 9353. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.9353>
7. Slonczewski J.C. Current-driven excitation of magnetic multilayers. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1996, vol. 159, iss. 1–2, L1–L7. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(96\)00062-5](https://doi.org/10.1016/0304-8853(96)00062-5)
8. Waintal X., Myers E.B., Brouwer P.W., Ralph D.C. Role of spin-dependent interface scattering in generating current-induced torques in magnetic multilayers. *Phys. Rev. B*, 2000, vol. 62, iss. 18, 12317. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.12317>
9. Stiles M.D., Zangwill A. Anatomy of spin-transfer torque. *Phys. Rev. B*, 2002, vol. 66, iss. 1, 014407. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.014407>
10. Volkov S.O., Tkach O.P., Odnodvoret L.V., Huzhnya Ya.V. Magnetoresistive properties of nanosized film materials: variation of measuring currents and minimization of electronic noise. *Journal Nano- And Electronic Physics*,

2016, vol. 8, iss. 3, 0303. [http://dx.doi.org/10.21272/jnep.8\(3\).03030](http://dx.doi.org/10.21272/jnep.8(3).03030)

11. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Yatsukhnenko S. Magnetic properties of doped Si<B,Ni> whiskers for spintronics. *Journal of Nano Research*, 2016, vol. 39, pp. 43–54. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.39.43>

12. Yatsukhnenko S., Druzhinin A., Ostrovskii I. et al. Nanoscale conductive channels in silicon whiskers with nickel impurity. *Nanoscale Research Letters*, 2017, vol. 12, iss. 78, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-1855-9>

13. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y. et al. Peculiarities of magnetoresistance in InSb whiskers at cryogenic temperatures. *Materials Research Bulletin*, 2015, vol. 72, pp. 324–330. <https://doi.org/10.1016/j.materres-bull.2015.08.016>

14. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu. et al. Berry phase in strained InSb whiskers. *Low Temperature Physics*, 2018, vol. 44, pp. 1189–1194. <https://doi.org/10.1063/1.5060974>

15. Murakawa H., Bahramy M. S., Tokunaga M. et al. Detection of Berry's phase in a bulk Rashba semiconductor. *Science*, 2013, vol. 342, iss. 6165, pp. 1490–1493. <https://doi.org/10.1126/science.1242247>

16. Veldhorst M., Snelder M., Hoek M. et al. Magnetotransport and induced superconductivity in Bi based three-dimensional topological insulators. *Phys. Status Solidi*, 2013, vol. 7, iss. 1–2, pp. 26–38. <https://doi.org/10.1002/pssr.201206408>

17. Nikolaeva A., Konopko L., Hubert T. E. et al. Effect of weak and high magnetic fields in longitudinal and transverse configurations on maneto-thermoelectric properties of quantum Bi wires. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2014, vol. 50, iss. 1, pp. 57–62. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068375514010128>

18. Druzhinin A.A., Lavitska E.N., Maryamova I.I., Kunert H.W. Stress imposing during microcrystals characterization at cryogenic temperatures. *Advanced Engineering Materials*, 2002, vol. 4, iss. 8, pp. 589–592. [https://doi.org/10.1002/1527-2648\(20020806\)4:8%3C589::AID-ADEM589%3E3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/1527-2648(20020806)4:8%3C589::AID-ADEM589%3E3.0.CO;2-F)

19. Xiaoling Zhang, Qingduan Meng, Liwen Zhang. Dependence of the deformation of 128×128 InSb focal-plane arrays on the silicon readout integrated circuit thickness. *The Open Electrical & Electronic Engineering Journal*, 2015, vol. 9, pp. 170–174. <http://dx.doi.org/10.2174/1874129001509010170>

20. Liwen Zhang, Jiexin Pu1, Ming Shao, Na Li. Numerical simulation and analysis of thermal stress in 8×8 InSb detector integrated microlens arrays with underfill. *Journal of Convergence Information Technology*, 2012, vol. 7, iss. 8.

21. Botcharova E., Freudenberger J., Schultz L. Mechanical and electrical properties of mechanically alloyed nanocrystalline Cu–Nb alloys. *Acta Materialia*, 2006, vol. 54, iss. 12, pp. 3333–3341. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.03.021>

22. Smith C.S. Piezoresistance effect in germanium and silicon. *Phys. Rev.*, 1954, vol. 94, iss. 1, pp. 42–49. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.94.42>

23. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu. et al. Variable-range hopping conductance in Si whiskers. *Phys. Status Solidi A*, 2014, vol. 211, iss. 2, pp. 504–508. <https://doi.org/10.1002/pssa.201300162>

24. Vanger A.I., Zabrodskii A.G., Tisnek T.V. Magnetoresistance of compensated Ge:As at ultrahigh frequencies in the metal-insulator phase transition region. *FTP*, 2000, vol. 34, iss. 7, pp. 774–782. (Rus). <https://journals.ioffe.ru/articles/37181>

25. Litvinenko K.L., Nikzad L., Pidgeon C.R. et al. Temperature dependence of the electron Landé *g* factor in InSb and GaAs. *Phys. Rev. B*, 2008, vol. 77, iss. 3, 033204. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.77.033204>

26. Barlian A.A., Park S.J., Mukundan V., Pruitt B.L. Design and characterization of microfabricated piezoresistive floating element-based shear stress sensors. *Sens. Actuators A*, 2007, vol. 134, iss. 1, pp. 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.04.035>

27. Naumova O.V., Popov V.P., Aseev A.I. et al. Silicon-on-insulator nanowire transistor for medical biosensors. In *EuroSOI International conference*, 2009, Goteborg, pp. 69–70. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-15868-1>

28. Günel H. Y., Batov I. E., Hardtdegen H. et al. Supercurrent in Nb/InAs-nanowire/Nb Josephson junctions. *J. Appl. Phys.*, 2012, vol. 112, iss. 3, 034316. <https://doi.org/10.1063/1.4745024>

29. Claeys C., Simon E. Perspectives of silicon-on-insulator technologies for cryogenic electronics. In: Hemment P.L.F., Lysenko V.S., Nazarov A.N. (eds) *Perspectives, Science and Technologies for Novel Silicon on Insulator Devices*. NATO Science Series (Series 3. High Technology), vol. 73. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4261-8_23

30. Rife J.C., Miller M.M., Sheehan P.E. et al. Design and performance of GMR sensors for the detection of magnetic microbeads in biosensors. *Sensors and Actuators*, 2003, A107, pp. 209–218. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(03\)00380-7](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(03)00380-7)

31. Lagae L., Wirix-Speetjens R., Das J. et al. On-chip manipulation and magnetization assessment of magnetic bead ensembles by integrated spin-valve sensors. *J. Appl. Phys.*, 2002, vol. 91, iss. 7786, pp. 7445–7447. <https://doi.org/10.1063/1.1447288>

Received 23.05 2019

DOI: 10.15222/ТКЕА2019.3-4.03

УДК 625.315.592

А. О. ДРУЖИНІН, Ю. М. ХОВЕРКО,
І. П. ОСТРОВСЬКИЙ, Н. С. ЛЯХ-КАГУЙ, О. А. ПАСИНКОВА

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»,
Польща, м. Вроцлав, Інститут низьких температур
та структурних досліджень

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ДЕФОРМАЦІЙНО-СТИМУЛЬОВАНІ ЕФЕКТИ В МІКРОСТРУКТУРАХ АНТИМОНІДУ ІНДІЮ ЗА КРІОГЕННИХ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ СЕНСОРНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

У роботі досліджено деформаційно-стимульоване змінення електрофізичних параметрів ниткоподібних кристалів антимоніду індію за кріогенних температур у сильних магнітних полях (до 10 Тл). Ниткоподібні кристали InSb вирощувалися методом хімічних газотранспортних реакцій. Температура зони кристалізації становила 720 К, зони випаровування — 850 К. Легування кристалів здійснювалося домішкою олова в процесі росту, а концентрація носіїв заряду, згідно з дослідженнями Холла, становила

$6 \cdot 10^{16} - 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для досліджень були вибрані ниткоподібні кристали InSb довжиною 2–3 мм з поперечними розмірами близько 30–40 мкм. Електричні контакти до ниткоподібних кристалів InSb були створені за допомогою мікродротів Au діаметром 10 мкм, які утворюють евтектику з мікрокристалом під час імпульсного зварювання.

Електропровідність ниткоподібних кристалів InSb досліджувалася в діапазоні температури від 4,2 до 300 К. Кристали охолоджували в гелієвому кріостаті. Температуру вимірювали за допомогою термopари Cu-CuFe , каліброваної за допомогою сенсора CERNOX. Деформацію зразків ($\epsilon = -3 \cdot 10^{-4}$ відн. од. при 4,2 К) створювали за рахунок різниці в коефіцієнтах термічного розширення ниткоподібних кристалів та матеріалу підкладки, закріплюючи кристали на мідній підкладці та охолоджуючи до низьких температур.

На основі порівняння опору деформованих та недеформованих кристалів були визначені коефіцієнти тензочутливості. Значення коефіцієнта тензочутливості мікрокристалів InSb за температури рідкого гелію становить $GF_{4,2\text{K}} \approx 72$ за концентрації носіїв заряду $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ та $GF_{4,2\text{K}} \approx 47$ за концентрації $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для зразків InSb з концентрацією $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ коефіцієнт тензочутливості виявляє нетипові властивості: вище температури рідкого азоту він змінює свій знак з позитивного на негативний. Абсолютне значення коефіцієнта тензочутливості як за гелієвих температур, так і в області кімнатної досягає приблизно 350, що можна пояснити наближенням концентрації носіїв заряду до фазового переходу «метал — діелектрик».

Встановлено, що для застосування в н'єзрезистивних датчиках, працездатних в широкому температурному діапазоні (4,2–300 К), слід використовувати мікрокристали InSb з концентрацією носіїв заряду $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для розробки датчиків магнітного поля з магніторезистивним принципом дії використовується ефект гігантського магнетоопору, який досягає 720% за температури 4,2 К. Такий датчик містить деформовані мікрокристали InSb з концентрацією носіїв заряду, що відповідає металевому боку переходу «метал — діелектрик» і становить $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Розроблений мікроелектронний датчик має надвисоку чутливість до магнітного поля (1500 мВ/Тл), а простота конструкції забезпечує одночасно низьку інерційність та високу продуктивність.

Ключові слова: ниткоподібні кристали, InSb , коефіцієнт тензочутливості, магнетоопір.

DOI: 10.15222/ТКЕА2019.3-4.03
УДК 625.315.592

А. А. ДРУЖИНИН, Ю. Н. ХОВЕРКО,
И. П. ОСТРОВСКИЙ, Н. С. ЛЯХ-КАГУЙ, Е. А. ПАСЫНКОВА

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»
Польша, г. Вроцлав, Институт низких температур и структурных исследований
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ДЕФОРМАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ ЭФФЕКТЫ В МИКРОСТРУКТУРАХ АНТИМОНИДА ИНДИЯ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ДЛЯ СЕНСОРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Исследованы деформационно-стимулированные изменения электрофизических параметров микрокристаллов антимонида индия при криогенных температурах в сильных магнитных полях (до 10 Тл). Установлено, что значение коэффициента тензочувствительности микрокристаллов InSb при температуре жидкого гелия составляет $GF_{4,2\text{K}} \approx 72$ при концентрации носителей заряда $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $GF_{4,2\text{K}} \approx 47$ при концентрации $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при деформации образцов $\epsilon = -3 \cdot 10^{-4}$ отн. ед. Для разработки датчиков магнитного поля с магніторезистивным принципом действия используется эффект гигантского магнетосопротивления, которое достигает 720% при температуре 4,2 К.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, InSb , коэффициент тензочувствительности, магнетосопротивление.

Опис статті для цитування:

Druzhinin A. O., Khoverko Yu. M., Ostrovskii I. P., Liakh-Kaguy N. S., Pasyunkova O. A. Deformation-induced effects in indium antimonide microstructures at cryogenic temperatures for sensor applications. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2019, № 3-4, с. 3–9. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2019.3-4.03>

Cite the article as:

Druzhinin A. O., Khoverko Yu. M., Ostrovskii I. P., Liakh-Kaguy N. S., Pasyunkova O. A. Deformation-induced effects in indium antimonide microstructures at cryogenic temperatures for sensor applications. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 3-4, pp. 3–9. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2019.3-4.03>

К. т. н. А. Н. ТЫНЫНЬКА

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: polalek562@gmail.com

УМЕНЬШЕНИЕ ШУМОВ И ПОМЕХ ПУТЕМ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ В КАНАЛАХ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ

Рассмотрены методы и правила конструирования радиоэлектронных средств, обеспечивающие снижение шумов и помех при построении дискретно-аналоговых каналов преобразования информации в ближней зоне распространения электромагнитной энергии. Даны рекомендации по выбору компонентов, монтажу кабелей и соединителей, конструированию печатных узлов и фильтрации помех.

Ключевые слова: дискретно-аналоговый канал, электронное конструирование, помехи, компоненты, печатные платы.

Интенсивность шумов и помех часто связана не только с принципиальной электрической схемой, но и с качеством конструкторских решений, принятых при построении систем передачи и обработки данных в ближней зоне распространения электромагнитной энергии, где размеры излучателя помехи намного меньше длины волны излучения. Неудачные решения повышают уровень ошибок при приеме и передаче сообщений (это, например, неподходящая конструкция и технология изготовления выбранных электронных компонентов; не лучшая распайка сигнальных и земляных проводников на контакты соединителей; неоптимальное число слоев печатной платы и их чередование).

Анализ литературы в статье [1], также посвященной конструкторским приемам уменьшения шумов и помех, показал, что имеющиеся работы не охватывают все аспекты выбора конструкций, электрорадиоэлементов и материалов, которые без излишних затрат обеспечивают минимальные шумы и помехи в дискретно-непрерывных каналах высокоскоростной обработки данных. В продолжение работы [1], где рассмотрены методы уменьшения шумов путем выбора рациональных электрорадиоэлементов, заземления и распределения питания, в настоящей статье показаны возможности защиты электрически коротких каналов обработки данных от излучаемых и кондуктивных помех, которые связаны с материалами и конструкциями печатных плат, особенностями применения фильтров и выбора соединителей в широком диапазоне от 10 кГц

до частот, для которых применима модель с сосредоточенными сопротивлением, индуктивностью и емкостью.

Фильтры

EMI-фильтры

EMI-фильтры (EMI, electromagnetic interference) [2] используются для подавления электромагнитных помех во вторичных цепях постоянного тока электронной аппаратуры, на шинах тактового сигнала и шинах передачи сигналов.

LC-фильтры крайне полезны при фильтрации выходных напряжений стабилизаторов импульсных источников питания. Однако если стабилизатор с выпрямителем расположен на отдельной плате, может оказаться полезным размещение подобных фильтров и в точках ввода напряжения питания на печатных платах с другими каскадами. Больше того, локальные ВЧ-фильтры могут потребоваться даже на выводах питания каждой микросхемы. Важная задача при этом — добиться как можно меньшего индуктивного сопротивления земляного вывода фильтра электромагнитных помех в верхней части частотного спектра. Хорошим выбором в данном случае будут безвыводные керамические конденсаторы в силу низкой величины паразитной индуктивности. Важно также, чтобы соединение выводов питания с шиной земли было выполнено максимально короткими проводниками. Проходное отверстие на шину земли и будет таким кратчайшим соединением.

Еще одна рекомендация, касающаяся проектирования топологии печатной платы: полезно устанавливать ограничения не только на дли-

ну, но и на ширину, и даже на толщину печатных проводников. Эффективность любой схемы фильтра в большой степени зависит от компактности конструкции и использования шин земли большой площади.

Использование технологии MLCC

Фильтры на базе технологии многослойных керамических конденсаторов (MLCC) удобны и эффективны для защиты от внешних помех и подавления собственных паразитных излучений [3]. Особенно популярны они в силовой электронике благодаря своим небольшим размерам и стоимости, низкому эквивалентному последовательному сопротивлению и высокой надежности. Ассортимент таких фильтров достаточно широк, это многослойные пассивные пространственные структуры, изготовленные по технологии X2Y; варисторные фильтры; конденсаторные и варисторные сборки; трехвыводные чипы; π -фильтры поверхностного монтажа; фильтры под пайку; фильтры с резьбой для установки на панель; фильтры индивидуальных конфигураций, выполняемые под заказ. Здесь, правда, нужно учитывать зависимость емкости от приложенного напряжения постоянного или медленно меняющегося тока. Это усложняет задачу точного выбора емкости конденсатора и правильного выбора типа многослойного конденсатора, поскольку самую сильную зависимость емкости от напряжения имеют конденсаторы из сегнето-керамического материала с наибольшей диэлектрической проницаемостью.

Конструкция фильтров на основе LC- или RC-цепей сравнительно сложна, а при монтаже они занимают много места. Меньшую площадь занимают фильтры на основе стандартных керамических конденсаторов, но для конструкторов более удобны миниатюрные проходные фильтры простой конструкции, состоящие из керамического конденсатора и ферритовой индуктивности. Они обладают большим сопротивлением изоляции, а малая собственная индуктивность сдвигает нежелательные резонансные явления далеко в высокочастотную область. Проходные керамические конденсаторы изготавливают из того же материала и по той же технологии, что и стандартные, но проходные имеют три полюса (четыре внешних вывода), их паразитная индуктивность в четыре раза меньше, чем стандартных, а значит меньше и индуктивное сопротивление ωL .

На рис. 1 показаны электрические схемы однозвенных проходных фильтров нижних частот, а на рис. 2 — внешний вид миниатюрных фильтров. Наиболее экономична C-схема, она имеет самую низкую паразитную индуктив-

ность (рис. 1, а). Для цепей питания емкость фильтра выбирается тем большей, чем меньше сопротивление нагрузки. В электрических цепях при низком сопротивлении источника помехи и высоком сопротивлении нагрузки применяют L-C-схему, приведенную на рис. 1, б. В случае противоположного соотношения сопротивлений, а также когда они неизвестны или изменяются в процессе работы, выбирают L-C-схему на рис. 1, в. Применение π -фильтра предполагает низкое сопротивление источника и нагрузки (рис. 1, г). Появление второго конденсатора значительно уменьшает уровень помех на выходе. T-фильтр предназначен для цепей коммутации при высоком сопротивлении источника и нагрузки (рис. 1, д). Кроме однозвенных применяют сдвоенные π - и T-схемы. Вносимое фильтром затухание зависит от рабочей частоты и выбранной схемы. По увеличению эффективности по-

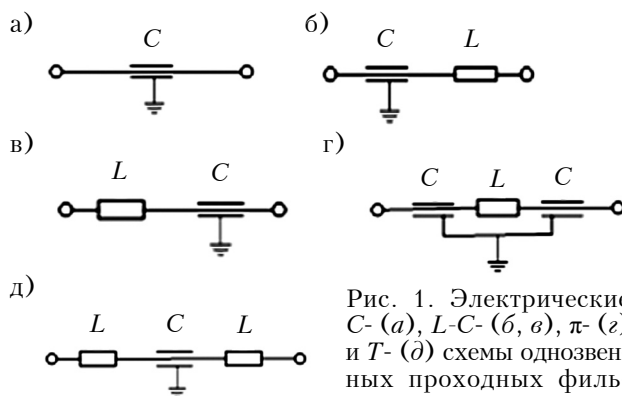


Рис. 1. Электрические C- (а), L-C- (б, в), π - (г) и T- (д) схемы однозвенных проходных фильтров нижних частот



Рис. 2. Основные типы конструктивного оформления миниатюрных фильтров [4]:

а — резьбовые, герметизированные компаундом; б — безрезьбовые, герметизированные металлокерамическим спаем; в — безрезьбовые, герметизированные компаундом; г — резьбовые без шестигранной головки; д — для прессовой посадки; е — для большого напряжения и тока; ж — глазковые

давления помех схемы располагаются в последовательности $C \rightarrow L-C \rightarrow T \rightarrow \pi$.

К основным параметрам фильтров, независимо от электрической схемы, относятся: электрическая емкость, уровень подавления помехи, вносимое затухание полезного сигнала, диапазон рабочих температур, сопротивление изоляции, рабочий ток, герметичность.

Конденсаторы для проходных фильтров нижних частот применяют трубчатые и многослойные дисковые [5]. Керамический материал влияет также на температурную стабильность и величину электрической емкости. В зарубежной продукции нашла применение керамика на основе титаната бария, и конденсаторы выпускаются трех групп: сверхстабильные (с диэлектриком NPO), чьи предельные изменения емкости не превышают 30 ppm/°C при колебаниях температуры от -55 до +125°C; стабильные (с диэлектриком X7R), допускающие изменение емкости в пределах $\pm 15\%$; конденсаторы общего применения, чья плавающая емкость может изменяться вплоть до 90%.

Индуктивные элементы фильтров изготавливают в виде колец или трубок из термостабильного феррита, надетых на сигнальный вывод фильтра.

Проходные конденсаторы фильтра должны монтироваться на входе и выходе для реализации как можно более короткого пути тока входной цепи по корпусу. При этом должен обеспечиваться надежный электрический контакт между корпусом и фланцем конденсатора по всему его периметру.

Использование технологии MLV

Фильтры другого вида — с многослойными варисторами, изготовленными по технологии MLV (multilayer varistor) [6], с ультранизкой эквивалентной индуктивностью — обеспечивают самую быструю среди всех варисторов защиту от электростатических разрядов и перенапряжения. Примером применения технологии MLV являются балансные фильтры — интегральные однокорпусные пассивные компоненты, содержащие три конденсатора с функцией варистора, включенные по балансной схеме (рис. 3).

В этом изделии вывод заземления имеет двухэлектродную, как бы расщепленную, конфигурацию, что обеспечивает взаимную компенсацию паразитных магнитных полей.

Внешний и внутренний виды фильтра и электрические соединения выводов изображены на рис. 4. Номиналы CV2 и CV3 одинаковы и вдвое превышают номинал CV1. Их напряжения пробоя также равны, но вдвое уступают напряжению пробоя CV1.

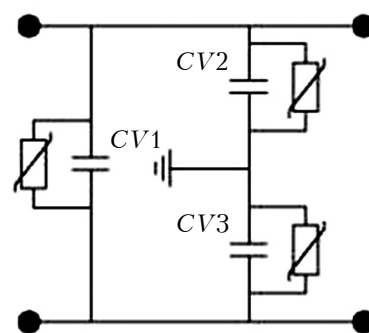


Рис. 3. Схема балансного фильтра, изготавливаемого по технологии MLV

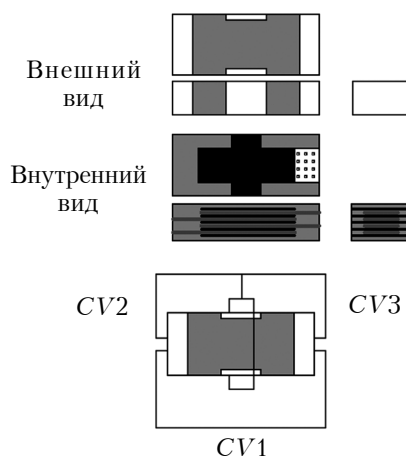


Рис. 4. Структура балансного фильтра [5]

Основные преимущества такого фильтра:

- экономия площади печатной платы;
- полная симметричность плеч в силу идентичности компонентов, изготавливаемых в одном технологическом процессе;
- постоянство характеристик фильтра при любых изменениях полезного сигнала, поскольку через фильтр протекают только токи помех из-за включения по схеме шунта.

По технологии MLV многослойные варисторы на основе оксида цинка выпускаются и отдельно от фильтров и тоже используются для защиты от электростатических разрядов чувствительных электронных цепей: интегральных микросхем, затворов МОП-транзисторов, низкочастотных аналоговых и цифровых цепей управления, цепей питания, высокоскоростных портов и линий передачи данных. Варисторы помещаются в сверхмалых корпусах.

Использование технологии LTCC

Судя по современным тенденциям, разработчикам аппаратуры следует настраивать себя на поиск компонентов, содержащих несколько схемных элементов в одном корпусе. Здесь ви-

дится перспективной технология многослойного низкотемпературного спекания (LTCC, low temperature co-fired ceramics) [7]: несколько слоев подложки после ряда планарных технологических операций собирают в пакет, ламинируют и подвергают спеканию при температуре около 900°C , после чего структура подложки становится компактной однородной. Технология LTCC также позволяет встраивать и сосредоточенные компоненты внутрь однородной структуры. Получающаяся трехмерная конструкция функционирует так, как если бы она состояла из одного слоя, но обладает лучшими параметрами.

Важнейшим преимуществом LTCC-технологии является возможность объемной интеграции в трехмерной среде, что облегчает совмещение в одном корпусе большого числа пассивных (активных и реактивных) компонентов, которые могут составить фильтр (рис. 5). Главные достоинства этой технологии и производимых по ней изделий:

- хорошо подходит (и удовлетворяет требованиям к надежности) и для серийного, и для массового производства при низкой стоимости изделий;
- обеспечивает высокую степень интеграции, что позволяет экономить площадь печатной платы;
- гарантирует высокую точность и повторяемость параметров компонентов, что приводит к хорошим характеристикам фильтров, особенно балансных;
- уменьшает линейные размеры конструкций и расширяет частотный диапазон создаваемых фильтров до 10 ГГц;
- относительно низкая температура спекания дает возможность применения высококачественных проводящих чернил, а также золота и серебра, материалов с высокой проводимостью, что помогает повысить помехоустойчивость ответственных мест конструкции.

Разработчику, однако, нужно иметь в виду необходимость подавления нескольких нежелательных резонансов, которые могут появиться вследствие паразитных реактивностей этой многослойной конструкции. Чтобы не допустить нежелательные резонансы, нужно на стадии проектирования пользоваться полной информацией производителя об эквивалентной схеме

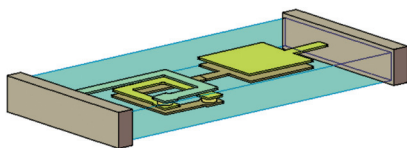


Рис. 5. Внутренний вид законченного LC-фильтра, выполненного по технологии LTCC [7]

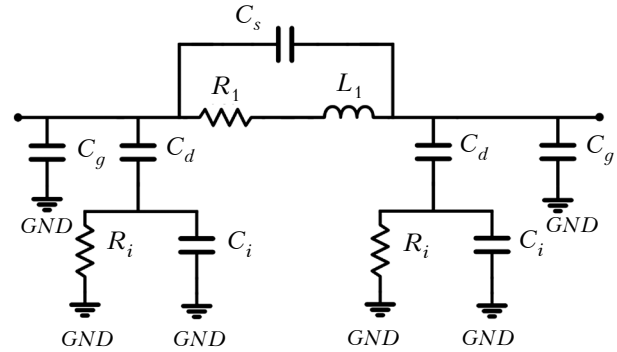


Рис. 6. Эквивалентная схема катушки индуктивности, встроенной в конструктивный модуль по технологии LTCC [8]

компонента. Рассмотрим для примера катушку индуктивности, интегрированную с другими LTCC-компонентами, схема которой представлена на рис. 6. Катушка рассматривается вместе с земляным слоем, который присутствует во всех модулях. В ее эквивалентной схеме кроме межвитковой емкости C_s появились дополнительные, по сравнению с одиночной катушкой индуктивности, емкости: C_g — между петлями катушки и земляной шиной; C_d — между петлями катушки и подложкой; C_i — емкость подложки, зашунтированная сопротивлением утечки R_i . Все эти емкости вместе с индуктивностью могут быть причиной появления резонанса той или иной добротности в какой-либо точке частотной оси.

Использование фильтров-бусин

На линии подключения источника питания иногда может быть полезным применение ферритовой бусины: она эффективно подавит высокочастотный шум питания, разделит линии аналогового и цифрового питания у интегральных микросхем, обрабатывающих смешанные сигналы, и не нарушит изоляцию между линиями.

Ферритовые фильтры-бусины представляют собой пассивные устройства, которые фильтруют шумы в широком диапазоне частот. Ферритовое кольцо увеличивает индуктивность проходящего через него участка провода в сотни (вплоть до тысячи) раз [9], что и обеспечивает подавление помех высокой частоты. Бусины включаются последовательно с линией питания и образуют с конденсаторами, заземляющими шумы, фильтры нижних частот, что дополнительно уменьшает шум импульсного источника питания.

При этом следует иметь в виду, что при применении бусин не исключены ошибки с негативными последствиями, например нежелательный резонанс из-за объединения бусины с развязывающим конденсатором для фильтрации нижних частот.

Схема замещения ферритовой бусины содержит резисторы, катушку индуктивности и конденсатор, т. е. импеданс бусин может носить индуктивный, резистивный и емкостный характер. Для уменьшения высокочастотного шума бусина должна работать в резистивной области — тогда компонент действует как резистор и рассеивает энергию шума в виде тепла.

Модель ферритовой бусины может использоваться при анализе схем фильтрации шумов, например, для определения резонансных частот при объединении с емкостями схемы. Если такую бусину использовать в верхнем (последовательном) плече делителя напряжения, в нижнее (параллельное) плечо которого включен резистор или конденсатор, то получим простейший фильтр для подавления радиочастотных шумов, причем крутизна амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра будет большей в случае емкостного нижнего плеча. Однако зачастую нижнее плечо в делителе вообще отсутствует — его роль играют паразитные элементы схемы (входная емкость микросхем, емкость дорожек платы и т. п.).

Для изготовления бусин, предназначенных для использования в качестве чип-фильтров, выбираются ферриты с большими потерями на перемагничивание (основное отличие чип-фильтров от чип-индуктивностей заключается в выборе материала). Чем чаще феррит перемагничивается (выше частота), тем больше на нем теряется энергии, выделяющейся в виде тепла. Все, что выделяет тепло, является активным сопротивлением, а не катушкой индуктивности.

Принято нормировать бусины по импедансу на частоте 100 МГц. Наиболее полную информацию для разработчика дает АЧХ, имеющаяся в документах производителя наряду с техническим описанием компонента, его параметрами, режимами эксплуатации, схемами включения и др. АЧХ показывает, в какой полосе активное сопротивление преобладает над реактивным и снижает добротность паразитных колебательных контуров.

Поскольку импеданс феррита зависит от ряда взаимосвязанных переменных, его трудно выразить аналитически, потому выбрать подходящий материал достаточно проблематично. Выбирая бусины под конкретную задачу, конструктору правильнее всего опираться на характеристики системы.

Самое типичное применение бусин — фильтр аналогового питания. Когда внутренние КМОП-каскады цифровых схем переключаются, они создают много шума, который распространяется по цепям питания. Верхние частоты спектра этого шума могут быть намного больше такто-

вой частоты цифровой части. Если рядом нужно разместить какие-то чувствительные аналоговые устройства, то бусины могут быть хорошим решением.

Кроме этого, бусины часто применяются для подавления паразитного излучения длинных кабелей. Для этой цели удобны бусины в виде полого цилиндра, кольца или тора. Большей индуктивностью из них обладает многослойная тороидальная обмотка, но чаще всего выбирают бусины в форме полого цилиндра, в отверстие которого пропускается проводник или вывод радиокомпонента. Под монтаж на поверхность они выпускаются и в виде параллелепипеда по многослойной пленочной технологии [10]. Один виток обмотки формируется на двух слоях тонкой подложки. Сотни слоев при спекании соединяются и формируют объемную катушку повышенной индуктивности с ферритовым стержнем внутри. Низкочастотная конструкция предполагает размещение слоев в горизонтальной плоскости, а для СВЧ-диапазона (свыше 1 ГГц) применяется вертикальная структура, которая обеспечивает меньшую емкость между витками и выводными электродами. Вследствие этого расширяется рабочая полоса частот чип-фильтра. В этом случае размеры компонента меньше, а индуктивное сопротивление на высоких частотах больше за счет использования дополнительной структуры катушки вместо обычного сплошного ферритового стержня.

Фильтрующий эффект увеличивается при использовании шунтирующих конденсаторов, подключаемых к земле; этому же способствует низкое выходное сопротивление источника. Выбор номинала конденсатора зависит от спектра помех и частоты затухания.

Установка фильтров близко к источнику помех уменьшает эффективную длину проводящих антенн с высокочастотным шумом.

Выбор чип-фильтров производится по таким основным параметрам:

- рабочий диапазон частот; импеданс на тестовой частоте 100 МГц (1000 МГц для СВЧ-диапазона);
- сопротивление по постоянному току, которое зависит от длины чипа, числа слоев в феррите, толщины и конфигурации и может находиться в пределах от нескольких мОм до нескольких Ом в зависимости от типа;
- максимально допустимый ток;
- предельный рабочий ток, выше которого происходит насыщение ферритового материала (при насыщении импеданс снижается до 25%);
- номинальный ток, т. е. разрешенный постоянный ток через чип-фильтр (нагрев не превышает 20°C);

- допустимое отклонение импеданса от номинала;
- размеры корпуса;
- рабочий температурный диапазон;
- амплитудно-частотная характеристика.

Порядок выбора фильтра следующий. Определяется спектр помех, требуемый уровень их подавления и диапазон рабочих токов. На этом основании можно выбрать импеданс и допустимое сопротивление фильтра по постоянному току, чтобы не превысить расчетное падение напряжения. Значения тока и сопротивления особенно важны при установке чип-фильтров в цепях питания. Выбранный тип должен обеспечить работу фильтра без насыщения.

Чипы монтируются на плату пайкой при температуре 220–240°C с последующей ультразвуковой очисткой остатков флюса. Режим операции: частота колебаний — не более 28 кГц, время обработки — в пределах 5 мин.

Кабели и соединители

Задача борьбы с помехами в соединительных кабелях хорошо решается с помощью ферритовых чип-фильтров, размещаемых в точках присоединения кабелей [9].

В связи с трудностями выбора подходящих фильтров можно дать несколько рекомендаций по их использованию, уменьшающих риск ошибки:

- следует устанавливать последовательно на проводе не один, а минимум три фильтра, изготовленных из разных материалов, что позволит подавлять помехи в широком диапазоне частот и обеспечивать максимальные значения полных сопротивлений в области низких, средних и высоких частот;
- после монтажа проводить испытания фильтров, проверять эффективность подавления помех во всем интересующем диапазоне частот и токов.

Для того чтобы минимизировать перекрестные помехи внутри кабеля, сигналы, которые передаются по нему, должны быть приблизительно равны как по току, так и по напряжению (с разницей в пределах 10 дБ).

Рекомендуется возможно шире использовать фильтрующие соединители. Замена стандартных соединителей на соединители со встроенными фильтрующими элементами — экономически эффективное решение для обеспечения электромагнитной совместимости при создании надежных устройств с высокой плотностью компоновки. Оно дает возможность конкурировать с другими аналогами ЭМС-исполнения, при этом:

- уменьшаются затраты на элементную базу и компоненты;

- снижается масса аппаратуры;
- экономится системное пространство;
- уменьшается время разработки;
- облегчается и ускоряется модификация и модернизация;
- сводятся к минимуму изменения в технической документации.

На рис. 7 изображен многовыводной фильтрующий соединитель с гнездовыми контактами.

Фильтрующие соединители выпускаются в герметичном исполнении, а также для жестких условий эксплуатации.

В качестве соединителей для высокоскоростной передачи данных можно выбирать как цилиндрические конструкции, так и модульные серии разных производителей. Электрический соединитель — изделие электромеханическое, а значит, по своей природе он сочетает в себе ряд функций и качеств, влияющих на надежность работы: обеспечение физического контакта с малым импедансом в условиях механических воздействий, возможность многократных циклов сочленения-расчленения и прочее.

Для обеспечения оптимальных параметров разрабатываемой аппаратуры необходимо не только выбрать подходящий соединитель, но и обеспечить его правильную установку и соединение с элементами электрической схемы. Кроме того, современные технологии сборки электронных устройств накладывают дополнительные требования на технологичность. Так, например, в определенных задачах, когда плата собирается по технологии поверхностного монтажа, бывает важно в рамках того же сборочного процесса обеспечить и монтаж соединителей, поскольку иначе их монтаж в отверстия потребует дополнительных временных затрат и ручного труда.

Сигнальные соединители в современных устройствах должны в первую очередь обеспечивать высокий уровень целостности сигнала. Это значит, что среди основных предъявляемых к ним электрических требований — малое сопротивление контакта и малые перекрестные помехи, что часто достигается продуманным распределением сигнала по контактам и применением экранов в конструкции. Кроме того, сигнальные соединители малогабаритной техники должны



Рис. 7. Фильтрующий соединитель [4]

быть малых размеров, а это означает высокую плотность контактов и большую опасность перекрестных помех.

Остальные требования, такие как расчетное число сочленений, диэлектрическая прочность, допустимый ток, рабочее напряжение и др., для сигнальных соединителей не так важны. Но при этом следует учитывать, что иногда сигнальные контакты используются для низковольтного питания, причем в современных изделиях токовая нагрузка может быть значительной, поэтому величина допустимого тока, приходящегося на один контакт, в этом случае становится важным параметром.

Кроме этого, в условиях расширяющегося применения бессвинцовых припоев одним из важнейших параметров становится способность корпуса выдерживать повышенные температуры пайки.

Печатные платы

С точки зрения борьбы с шумами на двусторонней печатной плате идеальным решением было бы выделение одной стороны платы полностью под шину земли. Практически это недостижимо из-за стремления к микроминиатюризации конструкции, но тем не менее, нужно стремиться к тому, чтобы под шину земли была отведена как можно большая поверхность платы: желательно, чтобы «землей» заполнялись все, даже самые незначительные, участки, оставшиеся после прокладки проводников межэлементной связи. Все островки шины земли должны быть электрически соединены между собой достаточно широкими перемычками, поскольку узкие могут существенно уменьшить эффективность использования шины. Очевидно, что в таком случае после автоматической трассировки следует обязательно проводить ручную доводку.

В отличие от двусторонней платы, при проектировании многослойной вполне реально выделить под «землю» один слой, и поэтому для достижения рассматриваемой цели многослойные платы более предпочтительны. Если отдельный слой выделить под питание и слои с шинами питания и земли разместить рядом, то получится дополнительная паразитная емкость, которая поможет развязке источника питания по высокой частоте. На внешних слоях тогда можно разместить трассы соединений компонентов поверхностного монтажа.

На печатной плате рекомендуется заземлять как минимум третью часть контактов соединителя, причем эти контакты следует чередовать с сигнальными.

Возможно, правильным приемом будет использование раздельных шин земли для аналого-

вых и цифровых цепей, причем эти шины лучше разнести друг от друга, чтобы минимизировать емкостную связь между ними. Если это реализовано, то АЦП, ЦАП и другие схемы со смешанными сигналами следует заземлять на аналоговую шину проводниками минимальной длины, чтобы исключить появление разности потенциалов между двумя земляными шинами, приводящей к негативным последствиям.

Выводы цифрового и аналогового питания также можно дополнительно изолировать друг от друга ферритовой бусиной [1, рис. 3].

Еще одна опасность, о которой следует помнить при разработке печатных плат, это интермодуляционные явления, возникающие при нелинейном преобразовании широкополосных сигналов или суммы нескольких частот. Результатом преобразования будут не только частотные искажения в пределах полосы частот входного сигнала, но и новые комбинационные частоты за пределами этой полосы, что нарушит требования к электромагнитной совместимости и ухудшит соотношение сигнал/шум канала обработки информации. Это явление получило название пассивной интермодуляции, поскольку генерирование нежелательных частот происходит вследствие нелинейности вольт-амперных характеристик пассивных элементов. Типичными источниками интермодуляционных явлений являются места соединений различных материалов. Поскольку соотношение составляющих композиционного материала влияет на уровень комбинационных частот, грамотный их выбор позволяет уменьшить пассивную интермодуляцию в проектируемых фильтрах, антеннах и других электрических цепях на печатных платах.

Следует также отметить, что важен выбор не только диэлектрика, но и материала проводника. Например, применение тонкопрофильной медной фольги вместо фольги со стандартным профилем позволит уменьшить уровень пассивной интермодуляции (до 15 дБ [11]). Это объясняется тем, что среднеквадратическое значение шероховатости (R_g) тонкопрофильной фольги в 4 раза меньше. Кроме того, чем выше профиль шероховатости, тем больше уровень вносимых потерь. С этой точки зрения лучше использовать не электролитически осажденную, а катанную медную фольгу с гладкой поверхностью.

Заключение

Для обеспечения широкого динамического диапазона в аналого-цифровых каналах высокоскоростной обработки данных разработчики вынуждены предпринимать меры по уменьшению шумов и помех, и здесь важен правильный выбор и корректное использование электронных

компонентів в цепях, прежде всего, питания и импульсных сигналов. Это важно, поскольку ошибочные конструкторские решения приводят к дополнительным помехам полезному сигналу. Соблюдение изложенных методов и правил позволяет без чрезмерных затрат свести к минимуму влияние электрических помех от работы проектируемой системы и электромагнитных наводок, экономит время на наладку проекта, обеспечивает создание в конечном итоге более надежных систем обработки данных.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Тыныныка А. Н. Конструкторские методы уменьшения шумов и помех в каналах с сосредоточенными параметрами при высокоскоростной обработке данных // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2019. — № 1–2. — С. 10–19. — <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.1-2.10>

2. EMI Filters and Filtered Interconnects: Каталог Spectrum Control Inc. — Москва: 2002.

3. Mark D. Waugh. Design solutions for DC bias in multilayer ceramic capacitors // Electronic Engineering Times Europe. — 2010. — Р. 34–36.

4. Джурицкий К. Зарубежные миниатюрные фильтры низкой частоты. Ключ к информации о фильтрах // Компоненты и технологии. — 2009. — № 1. — С. 54–57.

5. Крюков М. Использование проходных керамических конденсаторов в фильтрах электромагнитной совместимости // Компоненты и технологии. — 2002. — № 8. — С. 48–50.

6. Varistor filters. Application Note, 2008.

7. Design and manufacture of microwave filters using the LTCC TECHNIQUE. Application Note, 2008.

8. Celic A. Modelling and simulation of RF multilayer inductors in LTCC technology // Telecommunication Forum TELFOR. — 2009. — Vol. 1. — Р. 73–76.

9. Гуревич В. Ферритовые фильтры // Компоненты и технологии. — 2015. — № 10. — С. 16–18.

10. Самарин А. Многослойные ферритовые чип-фильтры компании Chilisin // Новости Электроники. — 2014. — № 5.

11. Белов Л., Кочемасов В., Строганова Е. Пассивная интермодуляция в СВЧ-цепях: механизмы появления, методы измерения и способы снижения // Электроника НТБ. — 2015. — № 3. — С. 80–91.

Дата поступления рукописи
в редакцию 15.05 2019 г.

DOI: 10.15222/TKEA2019.3-4.10
УДК 621.396:004.3

О. М. ТИНИНИКА

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: polalek562@gmail.com

ЗМЕНШЕННЯ ШУМІВ І ЗАВАД ШЛЯХОМ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИБОРУ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ В КАНАЛАХ З ЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНІЙ ОБРОБЦІ ДАНИХ

При проектуванні більшості радіоелектронних систем основна увага приділяється розробці власне виробів, а питання задоволення вимоги захисту від завад зазвичай відходять на другий план, що й викликало необхідність в появі даної роботи. Статтю присвячено методам і правилам електронного конструювання радіоелектронних засобів, що забезпечують зниження шумів і перешкод. Надано практичні рекомендації щодо вибору компонентів, монтажу кабелів і з'єднувачів, конструювання друкованих вузлів і фільтрації завад. Актуальність цих завдань обумовлена декількома основними причинами, такими як підвищення швидкодії напівпровідникових приладів і електронних схем в цілому, зменшення амплітуд робочих сигналів цифрових пристроїв, зростання впливу між'єднань і компонування вузлів на стійкість і швидкодію електронних пристроїв і систем, трудомісткість і великі матеріальні і часові витрати на пошук і усунення причин низької завадостійкості електронних пристроїв.

З ростом швидкодії і щільності компонування елементів забезпечення завадостійкості електромагнітної взаємодії між різними пристроями і системами стає найважливішим завданням конструювання радіоелектронних систем в цілому. В процесі конструкторської реалізації будь-якої електронної схеми неминуче вносяться додаткові паразитні параметри резистивного, індуктивного і ємнісного характеру, які можуть в неприпустимих межах погіршити швидкодію і завадостійкість в реальній конструкції, навіть призвести до повної втрати працездатності. Особливо великий вплив конструкція і монтаж мають на роботу надшвидкісних (високочастотних) схем і пристроїв — в таких випадках система на швидкодію, завадостійкість та електромагнітна сумісність стають основними критеріями якості електронної конструкції.

Ключові слова: дискретно-аналоговий канал, електронне конструювання, завади, компоненти, друковані плати.

REDUCTION OF NOISE AND INTERFERENCE BY RATIONAL SELECTION
OF ELECTRONIC COMPONENTS IN LUMPED PARAMETER CHANNELS
AT HIGH SPEED DATA PROCESSING

When designing most electronic systems, the main focus is on the development of the devices themselves, while the problem of meeting the requirements for the interference protection usually take second place, which calls for a need in this particular study.

The article is devoted to methods and rules for design of radio electronic devices, which reduce noise and interference. The author provides practical guidance in the issues of choosing components, installing cables and connectors, designing print nodes and interference filtering. The urgency of these tasks is caused by several principal reasons, i.e., the increase of the speed of semiconductor devices and electronic circuits in general, reducing the amplitudes of the working signals of digital devices, increasing effect of interconnects and cascade layouts on the stability and speed of electronic devices and systems, the complex, costly and time consuming process of finding and eliminating the causes of low noise immunity of electronic devices.

With the speed growth and the layout density of the elements, ensuring the noise immunity of the electromagnetic interaction between different devices and systems becomes the most important task of designing the radio electronic systems in general. When designing any electronic circuit, additional resistive, inductive and capacitive parasitic parameters are inevitably introduced. This can critically affect the performance of the real-life design by lowering its speed and noise immunity, even leading to complete failure. Design and installation have a particularly strong influence on the operation of high-speed (high-frequency) circuits and devices. In such cases, system speed, noise immunity and electromagnetic compatibility become the main criteria for the quality of electronic design.

Keywords: discrete-analogue channel, electronic design, interference, components, printed circuit boards.

REFERENCES

1. Tynynyka A. N. [Design methods for reducing noise and interference in channels with lumped parameters in high-speed data processing]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 1–2, pp. 10–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.1-2.10> (Rus)
2. *EMI Filters and Filtered Interconnects*: Katalog Spectrum Control Inc. Moscow, 2002.
3. Mark D. Waugh. Design solutions for DC bias in multilayer ceramic capacitors. *Electronic Engineering Times Europe*, 2010, pp. 34–36.
4. Dzhurinskiy. [Foreign miniature low-pass filters. The key to information about the filters]. *Components & Technologies*, 2009, no. 1, pp. 54–57. (Rus)
5. Kryukov M. [Use of pass-through ceramic capacitors in electro-magnetic compatibility filters]. *Components & Technologies*, 2002, no. 8, pp. 48–50. (Rus)
6. *Visitor filters*. Application Note, 2008.
7. *Design and manufacture of microwave filters using the LTCC TECHNIQUE*. Application Note, 2008.
8. Celic A. Modelling and simulation of RF multilayer inductors in LTCC technology. *Telecommunication Forum TELFOR*, 2009, vol. 1, pp. 73–76.
9. Gurevich V. [Ferrite filters]. *Components & Technologies*, 2015, no. 10, pp. 16–18. (Rus)
10. Samarin A. [Multilayer ferrite chip filter by Chilisn]. *Novosti Elektroniki*, 2014, no. 5. (Rus)
11. Belov L., Kochemasov V., Stroganova E. [Passive intermodulation in microwave circuits: appearance mechanisms, measurements and reduction methods]. *Electronics: STB*, 2015, no. 3, pp. 80–91. (Rus)

Описание статьи для цитирования:

Тыныныка А. М. Уменьшение шумов и помех путем рационального выбора электронных компонентов в каналах с сосредоточенными параметрами при высокоскоростной обработке данных. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2019, № 3-4, с. 10–18. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.10>

Cite the article as:

Tynynyka A. N. Reduction of noise and interference by rational selection of electronic components in channels with lumped parameters at high speed data processing *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 3-4, pp. 10-18. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.10>

К. ф.-м. н. А. В. ИВАНЧЕНКО, д. ф.-м. н. А. С. ТОНКОШКУР

Украина, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ ПОСЛЕ ТОКОВЫХ ПЕРЕГРУЗОК

Исследовано влияние токовых перегрузок на вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики, а также на электрические параметры фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей на основе монокристаллического кремния. В результате испытаний, проводимых в режиме циклических токовых перегрузок, установлено ухудшение всех основных электрических параметров. Проведено сравнение диапазона времени срабатывания самовосстанавливающихся предохранителей PolySwitch с длительностью развития пробоя фотоэлектрических преобразователей, и сделан вывод о перспективе использования таких предохранителей как средств защиты в нештатных ситуациях, связанных с токовыми перегрузками в солнечных батареях.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, вольт-амперная характеристика, вольт-ваттная характеристика, пробой, деградация, самовосстанавливающийся предохранитель.

Среди источников ненадежности фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечных батарей наиболее нежелательными являются токовые перегрузки и возникновение перегревов, включая замыкания непосредственно в них, а также короткие замыкания между их соединительными контактами [1–3]. Физическими причинами таких ситуаций могут быть повреждение коррозией в процессе эксплуатации составляющих их элементов, «скрытые» производственные дефекты, неисправные блокирующие и обводные диоды или деградация изоляции под действием окружающей среды [2].

Вопрос об уровне деградации и сохранности ФЭП после воздействия относительно высокой температуры в течение ограниченного промежутка времени рассматривался в [4, 5], где было установлено снижение напряжения холостого хода и тока короткого замыкания кремниевых ФЭП после термической обработки разной длительности, проводимой при температуре около 300°C в атмосферных условиях.

В последнее время этот вопрос исследовался в связи с перспективой решения задачи повышения надежности солнечных батарей путем использования самовосстанавливающихся предохранителей PPTC (polymeric positive temperature coefficient device) типа PolySwitch в качестве дополнительных устройств для изоляции неактивных (затененных или дефектных) областей как отдельных ФЭП, так и их модулей [6]. В частности, рассматривалась пробле-

ма несоответствия диапазона рабочих температур для фотоэлектрических модулей (максимальная регламентируемая температура — около 80°C [7]) и наиболее распространенных в настоящее время типов коммерческих PPTC предохранителей, для которых область фазового перехода (срабатывания) оценивается величинами порядка 125°C [8, 9]. Было установлено, что пребывание исследованных ФЭП на основе монокристаллического кремния на протяжении 6 часов при температуре до 150°C в темновом режиме и при освещении в разомкнутом и короткозамкнутом состояниях не приводит к значительным изменениям их основных функциональных характеристик и параметров.

В то же время исследования последствий непосредственного протекания больших токов через обратно смещенный диод ФЭП, приводящих к его нагреву и выходу из строя, до настоящего времени проводились в основном в целях углубленного изучения механизмов пробоя [10, 11]. При использовании современных средств защиты от токовых перегрузок, в частности самовосстанавливающихся предохранителей [12], возможно возникновение нештатной ситуации, когда через диод ФЭП некоторое непродолжительное время будет протекать большой ток (что соответствует реализации режима временного пробоя [13]). Однако вопрос об уровне деградации и сохранности ФЭП после кратковременного воздействия токовых перегрузок пока еще остается недостаточно изученным.

В настоящей работе исследовалось влияние временных токовых перегрузок на вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей и их технические параметры.

Образцы и методика эксперимента

Исследовались образцы ФЭП, изготовленные на основе монокристаллического кремния КДБ-10 с просветляющим покрытием на основе ИТО-пленки [8, 14].

Для регистрации световых вольт-амперных характеристик применялся специальный экспериментальный автоматизированный измерительный комплекс [15], использующий известный метод вольтметра-амперметра [16]. Стенд позволял в качестве источника света использовать естественное солнечное излучение и обеспечивал выполнение условий освещенности АМ1,5.

Состояние пробоя ФЭП достигалось подачей на него в течение нескольких минут постоянного напряжения обратного смещения. Это напряжение постепенно увеличивалось до значения, при котором начиналось резкое неуправляемое увеличения тока, после чего ФЭП отключался от источника напряжения с помощью переключателя. Временная зависимость температуры, полученная при реализации такого пробоя (рис. 1), свидетельствует о его тепловом характере.

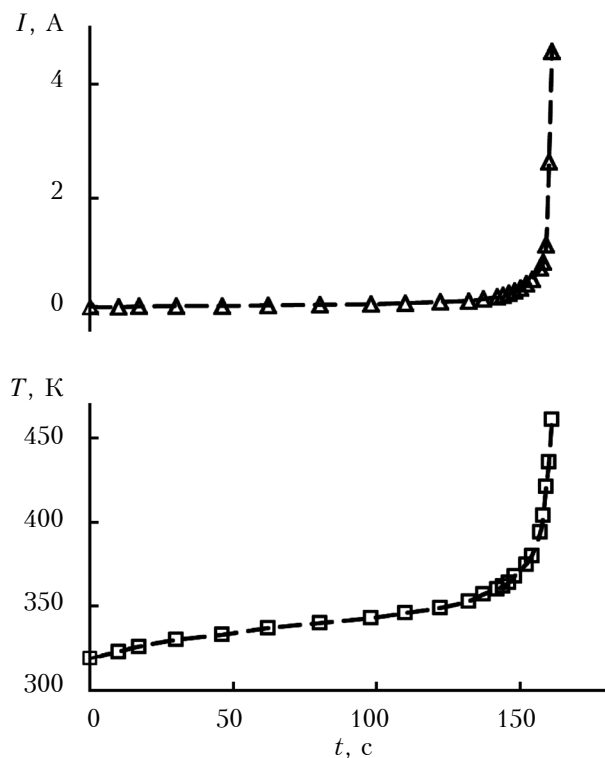


Рис. 1. Изменение во времени тока I и температуры T ФЭП при приложении к нему напряжения обратного смещения, достаточного для наступления теплового пробоя

Воздействие токовой перегрузки, соответствующее участку резкого возрастания зависимостей на рис. 1, было кратковременным (не превышало 5 с).

Для выявления наиболее общих закономерностей влияния токовых перегрузок на свойства рассматриваемых кремниевых ФЭП отбирались образцы с отличающимися исходными вольт-амперными (ВАХ) и вольт-ваттными (ВВХ) характеристиками, что было следствием предыстории их эксплуатации или технологического разброса при изготовлении (рис. 2).

Для изучения влияния циклических токовых перегрузок на работоспособность ФЭП экспериментальные исследования проводились в следующем порядке:

- измерялась исходная световая ВАХ исследуемого ФЭП;
- через ФЭП пропусклся темновой ток в направлении обратного смещения его диода,

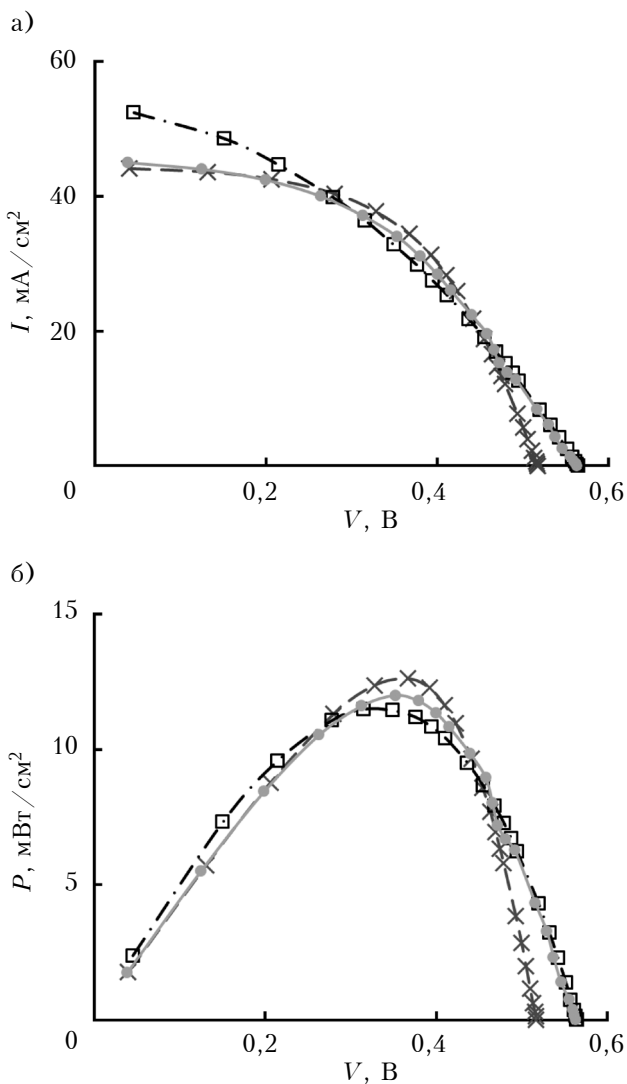


Рис. 2. Типичные световые ВАХ (а) и ВВХ (б) исследованных образцов ФЭП

и после возникновения теплового пробоя, что фиксировалось критическим увеличением тока и температуры, он отключался от источника напряжения;

— ФЭП в отключенном состоянии охлаждался до комнатной температуры, и повторно измерялась его ВАХ.

Последние два пункта, определяющие цикл токовой перегрузки, повторялись несколько раз. В результате фиксировались значения основных параметров ВАХ и ВВХ образца ФЭП: напряжение холостого хода V_{OC} (при разомкнутом ФЭП), ток короткого замыкания I_{SC} и отдаваемая во внешнюю цепь электрическая мощность P .

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 3 показаны типичные результаты измерений ВАХ и ВВХ фотоэлектрических преобразователей, которые были подвергнуты описанным выше токовым перегрузкам. Как вид-

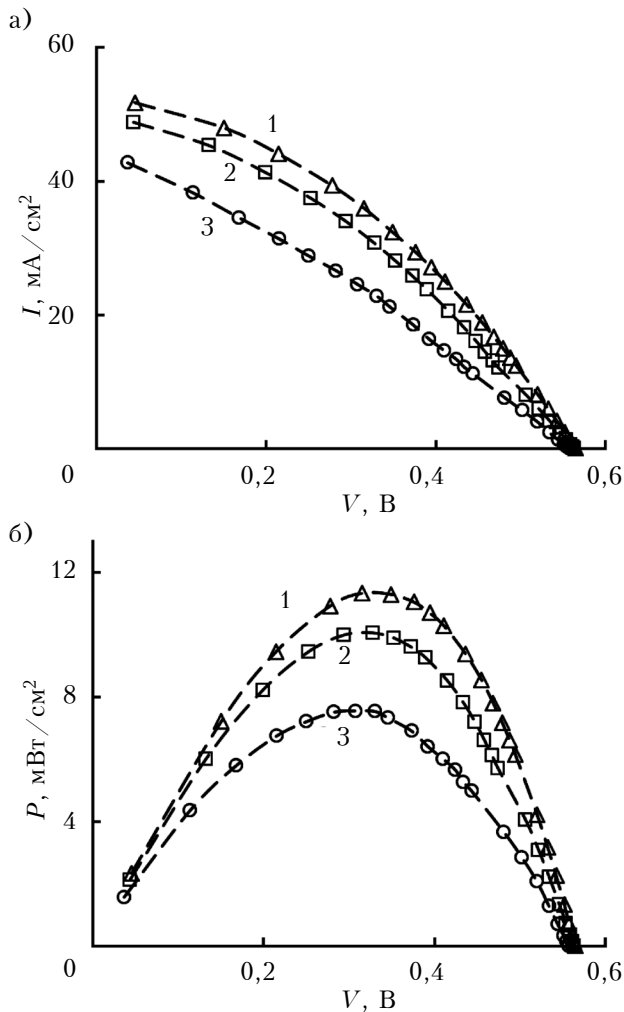


Рис. 3. Исходные ВАХ (а) и ВВХ (б) образца ФЭП (1) и полученные после двух (2) и восьми (3) циклов токовой перегрузки

но, кратковременное протекание тока в состоянии пробоя в направлении обратного смещения диода приводит к уменьшению тока и мощности, генерируемых ФЭП. Этот эффект носит аддитивный характер, т. е. большее число токовых перегрузок приводит к большему снижению тока и мощности.

Проанализируем приведенные на рис. 4 зависимости параметров ВАХ и ВВХ фотоэлектрических преобразователей от числа циклов пробоя ФЭП электрическим током (параметры нормированы на их значения, соответствующие исходному состоянию образца, V_{OC}^* , I_{SC}^* , ff^* и P_{max}^*). Экспериментальные данные аппроксимировались линейными зависимостями, по-

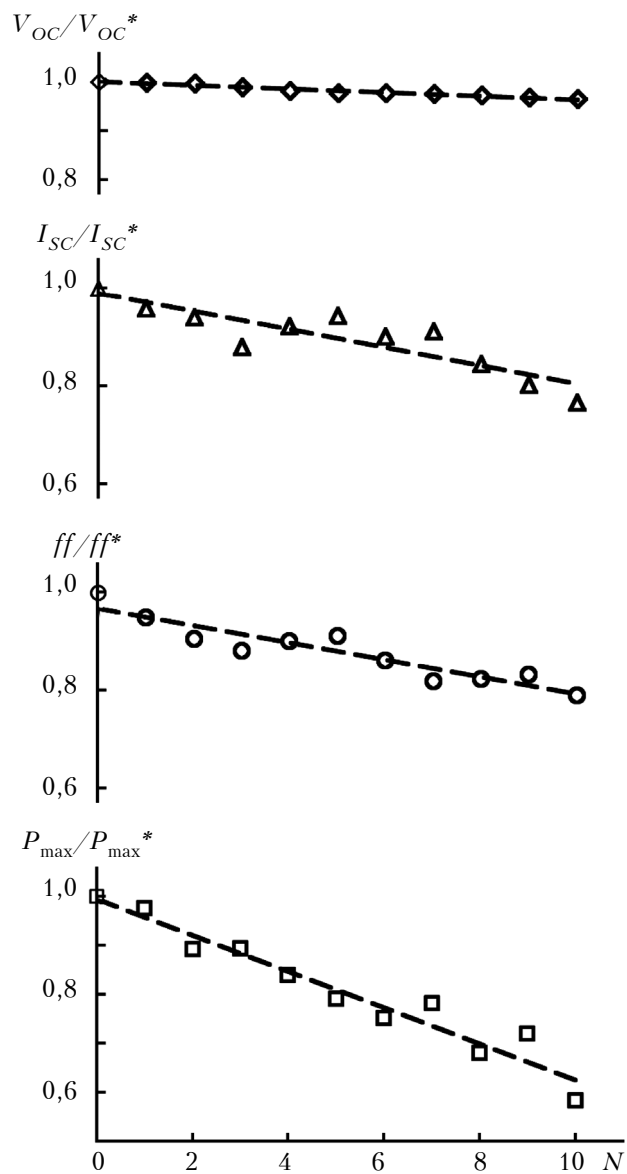


Рис. 4. Экспериментальные зависимости напряжения холостого хода V_{OC} , тока короткого замыкания I_{SC} , фактор заполнения ВАХ ff и максимальной мощности P_{max} ФЭП от числа циклов токовой перегрузки

лученными с использованием метода наименьших квадратов.

Отметим, что фактор заполнения ВАХ ff определялся в соответствии с известным выражением [15]

$$ff = \frac{I_{\max} V_{\max}}{I_{SC} V_{OC}},$$

где $I_{\max}$ и $V_{\max}$ — ток и напряжение на ВАХ ФЭП, соответствующие $P_{\max}$.

В таблице приведены усредненные по 10 образцам значения контролируемых параметров ФЭП. Как видно, все они имеют тенденцию к уменьшению с ростом числа циклов N пребывания ФЭП в состоянии пробоя, однако при этом напряжение холостого хода V_{OC} менее чувствительно к росту N , чем ток короткого замыкания I_{SC} и другие представленные параметры. Это обусловлено, прежде всего, тем, что значения максимальной мощности $P_{\max}$ и фактора ff связаны непосредственно с величиной тока.

Приведенные данные указывают на то, что кратковременные токовые перегрузки в обратном направлении диода ФЭП, в отличие от разогрева ФЭП внешними тепловыми источниками, приводят к существенному снижению отдаваемой им во внешнюю цепь мощности и деградации других параметров. В частности, полученные результаты позволяют прогнозировать уменьшение максимальной мощности на 3,5% после единичного пробоя ФЭП в обратном направлении. При этом ухудшение электрических характеристик ФЭП под воздействием токовых перегрузок носит аддитивный (накопительный) характер.

В таблице (3-й столбец) также приведены данные о разбросе значений средних относительных уменьшений контролируемых параметров за

один пробойный цикл, связанных с различием исходных ВАХ и ВВХ (рис. 2). Величина относительной погрешности указанных параметров ($\leq 5\%$) свидетельствует об общности исследованных закономерностей для ФЭП, независимо от предыстории их эксплуатации или технологического разброса параметров при их изготовлении.

Следует отметить, что независимо от физической природы пробоя (теплого, лавинного или туннельного [10, 11]) увеличение тока через ФЭП приводит к локальному разогреву его отдельных областей. Повышение температуры как отдельных областей (горячих точек), так и всего ФЭП позволяет рассматривать этот феномен в качестве основания для использования позисторных элементов типа PolySwitch, находящихся в контакте с ФЭП, как термосенсорных предохранителей [8, 17]. Как известно, диапазон времени срабатывания предохранителей PolySwitch составляет от единиц миллисекунд до нескольких секунд [9, 18]. Время, в течение которого происходит предпробойный разогрев ФЭП, оценивается интервалом в несколько минут, а длительность развития пробоя составляет около 5 с (см. рис. 1). На основании полученных данных можно предположить, что при возникновении нештатных ситуаций, связанных с токовыми перегрузками, указанные предохранители могут минимизировать их последствия, ограничив деградационные изменения параметров ФЭП в диапазоне, где эти изменения не приводят к существенным изменениям в работе солнечных батарей.

Выводы

Таким образом, исследования влияния кратковременных токовых перегрузок на вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики и электрические параметры фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей показали, что такие перегрузки приводят к аддитивной (накапливаемой) деградации параметров ФЭП. При этом в меньшей степени снижается напряжение холостого хода ($\approx 0,5\%$ за 1 цикл), в большей — ток короткого замыкания ($\approx 1,5\%$ за 1 цикл) и мощность (до 3,5% за 1 цикл). Исследованные закономерности наблюдаются независимо от предыстории эксплуатации ФЭП или технологического разброса параметров при их изготовлении.

Сравнение диапазона времени срабатывания предохранителей PolySwitch с длительностью развития пробоя ФЭП позволило предположить перспективность их использования в качестве средств защиты от токовых перегрузок при возникновении нештатных ситуаций в работе фотоэлектрических систем солнечных батарей.

Оценка влияния воздействия токовых перегрузок на параметры кремниевого ФЭП

Параметр ФЭП	Среднее относительное изменение за один пробойный цикл, %	Относительная погрешность оценки, %
Напряжение холостого хода V_{OC}	–0,5	1,5
Ток короткого замыкания I_{SC}	–1,5	5,0
Фактор заполнения ВАХ ff	–2	3,0
Максимальная мощность $P_{\max}$	–3,5	0,8

ІСПОЛЬЗОВАННІ ІСТОЧНИКИ

1. K ntges M., Kurtz S., Packard C. et. al. Review of failures of photovoltaic modules. – IEA PVPS Task 13, 2014.
2. United Solar Technologies / Главная / СМИ и литература / Основы солнечной энергетики / Солнечные модули и батареи. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ust.su/solar/media/section-inner17>. – 16.07.2109
3. Тонкошкур О. С., Накашидзе Л. В. Проблеми надійності фотоелектричних компонентів сонячних батарей // Відновлювана енергетика. – 2018. – № 3. – С. 21–31.
4. Radziemska E. Effect of temperature on dark current characteristics of silicon solar cells and diodes // International Journal of Energy Research. – 2006. – Vol. 30, iss. 2. – P. 127–134. – <https://doi.org/10.1002/er.1113>
5. Flammini M. G., Debernardi N., Le Ster M. et. al. The influence of heating time and temperature on the properties of CIGS solar cells // International Journal of Photoenergy. – 2016. – Vol. 2016. – Article ID 4089369. – 7 p. – <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4089369>
6. Иванченко А. В., Мазурик С. В., Тонкошкур А. С. Исследование характеристик кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей при перегреве // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2018. – № 4. – С. 14–20. – <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.14>
7. Гудкова А. В., Губин С. В., Белоконов В. И. Термостабилизация фотоэлектрических преобразователей для измерения ВАХ с импульсным источником света // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2012. – № 57. – С. 187–196.
8. Тонкошкур А. С., Иванченко А. В., Накашидзе Л. В., Мазурик С. В. Применение самовосстанавливающихся элементов для электрической защиты солнечных батарей // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2018. – № 1. – С. 43–49. – <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.1.43>
9. Гавриков В. Самовосстанавливающиеся РТС-предохранители для защиты от токовых перегрузок // Новости Электроники. – 2014. – № 12. – С. 11–15.
10. Bishop J. W. Microplasma breakdown and hot-spots in silicon solar cells // Solar cells. – 1989. – Vol. 26,

iss. 4. – P. 335–349. – [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(89\)90093-8](https://doi.org/10.1016/0379-6787(89)90093-8)

11. Breitenstein O., Bauer J., Bothe K. et al. Understanding junction breakdown in multicrystalline solar cells // Journal of Applied Physics. – 2011. – Vol. 109, iss. 7. – Article ID 071101. – 10 p. – <https://doi.org/10.1063/1.3562200>
12. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Mazurik S. V. Application of “PolySwitch” fuses for the limitation of current overloads in photovoltaic systems of solar arrays // Journal of Physics and Electronics. – 2018. – Vol. 26, N 1. – P. 77–82. – <https://doi.org/10.15421/331813>
13. Herrmann W., Adrian M., Wiesner W. Operational behaviour of commercial solar cells under reverse biased conditions // Proceedings of the Second World conference on photovoltaic solar energy conversion. – Austria, Vienna. – 1998. – P. 2357–2359.
14. Накашидзе Л. В., Кныш Л. И. Методология определения состава и схемных решений солнечных фотоэлектрических установок // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 10 (57). – С. 100–104.
15. Тонкошкур О. С., Иванченко А. В., Накашидзе Л. В., Мазурик С. В. Захист сонячних батарей від електричних перевантажень: монографія / За заг. ред. О. С. Тонкошкура. – Дніпро: ТОВ „АКЦЕНТ ПП”, 2018. – 113 с.
16. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов. – Москва: Наука, 1985. – 280 с.
17. Тонкошкур О. С. Схемотехнічні технології підвищення надійності відновлюваних джерел енергії на основі сонячних батарей з використанням елементів функціональної електроніки // Матеріали VII МНПК «Розвиток бізнес-аналітики, обліку та оподаткування в умовах глобалізації, загострення енергетичних проблем». – Україна, м. Дніпро. – 2019. – С. 210–212.
18. Трусов В. А., Гусев А. М. Элементы защиты электрических цепей от перенапряжений и сверхтоков // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2011. – Т. 2. – С. 221–224.

Дата поступления рукописи
в редакцию 17.07 2019 г.

DOI: 10.15222/TKEA2019.3-4.19
УДК 621.31

О. В. ИВАНЧЕНКО, О. С. ТОНКОШКУР

Україна, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

ЗМІНИ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНІЄВИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ ПІСЛЯ СТРУМОВИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ

Дослідженню впливу струмових перевантажень і локальних перегрівів на деградацію електричних характеристик фотоелектричних компонентів сонячних батарей останнім часом приділяється багато уваги. Це пов'язано, насамперед, із задачами підвищення надійності та довговічності експлуатації цих відновлюваних джерел електричної енергії. Особливу увагу такі дослідження привертають у зв'язку з появою нових методів і пристроїв підвищення надійності сонячних батарей шляхом ізоляції неактивних (дефектних або затінених) областей їхніх фотоелектричних компонентів (фотоелектричних перетворювачів і фотоелектричних модулів).

У даній роботі наведено результати досліджень впливу струмових перевантажень на вольт-амперні та вольт-ватні характеристики та електричні параметри фотоелектричних перетворювачів сонячних батарей на основі монокристалічного кремнію.

При випробуваннях використовувався режим циклічних струмових перевантажень – пропускання протягом декількох секунд електричного струму пробою через зворотно включений діод фотоелектрич-

ного перетворювача з наступним охолодженням до кімнатної температури. Після кожного циклу вимірювались вольт-амперна та вольт-ватна характеристики.

В результаті досліджень встановлено погіршення всіх основних електричних параметрів фотоелектричних перетворювачів (зменшення напруги розімкнутого кола, струму короткого замикання, фактора заповнення вольт-амперної характеристики і максимальної потужності) та визначено адитивний характер їхніх змін. Проведено порівняння діапазону часу спрацьовування запобіжників PolySwitch з тривалістю розвитку пробою фотоелектричних перетворювачів. Зроблено висновок про перспективу використання самовідновлюваних запобіжників PolySwitch як засобів захисту сонячних батарей від струмових перевантажень.

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач, вольт-амперна характеристика, вольт-ватна характеристика, пробій, деградація, самовідновлюваний запобіжник.

DOI: 10.15222/TKEA2019.3-4.19
UDC 621.31

A. V. IVANCHENKO, A. S. TONKOSHKUR

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

CHANGES IN THE CHARACTERISTICS OF SILICON PHOTOVOLTAIC CELLS OF SOLAR ARRAYS AFTER CURRENT OVERLOADS

Recently, much attention has been paid to the study of the influence of current overloads and local overheating on the degradation of the electrical characteristics of the photovoltaic components of solar arrays. First of all, it is connected with the tasks of increasing the reliability and durability of the operation of such renewable sources of electrical energy. Such studies are of particular interest due to the recent emergence of new methods and devices for improving the reliability of solar arrays by isolating inactive (defective or shaded) areas of their photovoltaic components (photovoltaic cells and photovoltaic modules).

This paper presents the research results on the influence of current overloads on the current-voltage and volt-watt characteristics and the electrical parameters of photovoltaic cells of solar arrays based on monocrystalline silicon.

The testing was performed using the cyclic current overload mode, which is the flow of electric breakdown current passed through the back-turned diode of a photovoltaic cell for several seconds. After that, the photovoltaic cell was cooled to room temperature, and then its current-voltage and volt-watt characteristics were measured.

The degradation (decrease) of all the basic electrical parameters of photovoltaic cells (open-circuit voltage, short-circuit current, filling factor of the current-voltage characteristic, and maximum power) has been established. The additive nature of the changes and the average relative decrease of the indicated electrical parameters for one breakdown cycle are determined. Comparison of the response time range of the PolySwitch fuses with the breakdown durations of photovoltaic cells is performed. The conclusion is drawn about the prospect of using such resettable fuses as protection in emergency situations that are associated with current overloads in solar arrays.

Keywords: photovoltaic cell, current-voltage characteristic, volt-watt characteristic, breakdown, degradation, resettable fuse.

REFERENCES

1. Köntges M., Kurtz S., Packard C. et. al. Review of failures of photovoltaic modules. IEA PVPS Task 13, 2014, 132 p.
2. United Solar Technologies / [Electronic resource]. Access mode: <http://ust.su/solar/media/section-inner17/1595/> 16.07.2109 (Rus)
3. Tonkoshkur O.S., Nakashydz L. V. [Problems of reliability of photovoltaic components of solar arrays]. Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable energy), 2018, no. 3, pp. 21–31. (Ukr)
4. Radziemska E. Effect of temperature on dark current characteristics of silicon solar cells and diodes. *International Journal of Energy Research*, 2006, vol. 30, iss. 2, pp. 127–134. <https://doi.org/10.1002/er.1113>
5. Flammini M. G., Debernardi N., Le Ster M. et. al. The influence of heating time and temperature on the properties of CIGSSe solar cells. *International Journal of Photoenergy*, 2016, vol. 2016, article ID 4089369, 7 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4089369>
6. Ivanchenko A.V., Mazurik S.V., Tonkoshkur A.S. [Investigation of the characteristics of silicon photovoltaic converters of solar batteries in case of overheating]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 4, pp.14–20. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.14> (Rus)
7. Gudkova A. V., Gubin S. V., Belokon' V. I. [Thermal stabilization of solar cells for current-voltage characteristics measurement with the pulsed light source]. *Otkrytyye infor-*

matsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii, 2012, no. 57, pp. 187–196. (Rus)

8. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydz L. V., Mazurik S. V. [Application of resettable elements for electrical protection of solar batteries]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 1, pp. 43–49. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.1.43> (Rus).

9. Gavrikov V. [Resettable PTC fuses for protection of current overload]. *Novosti Elektroniki*, 2014, no. 12, pp. 11–15. (Rus)

10. Bishop J. W. Microplasma breakdown and hot-spots in silicon solar cells. *Solar Cells*, 1989, vol. 26, iss. 4, pp. 335–349. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(89\)90093-8](https://doi.org/10.1016/0379-6787(89)90093-8)

11. Breitenstein O., Bauer J., Bothe K. et al. Understanding junction breakdown in multicrystalline solar cells. *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 109, iss. 7, article ID 071101, 10 p. <https://doi.org/10.1063/1.3562200>

12. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Mazurik S. V. Application of “PolySwitch” fuses for the limitation of current overloads in photovoltaic systems of solar arrays. *Journal of Physics and Electronics*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 77–82. <https://doi.org/10.15421/331813>

13. Herrmann W., Adrian M., Wiesner W. Operational behaviour of commercial solar cells under reverse biased conditions. / *Proceedings of the Second World Conference*

on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Austria, Vienna, 1998, pp. 2357–2359.

14. Nakashidze L. V., Knysh L. I. [Methodology for determining the composition and circuit design of solar photovoltaic equipments]. *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, 2008, no. 10 (57), pp. 100–104. (Rus)

15. Tonkoshkur O. S., Ivanchenko O. V., Nakashydz L. V., Mazurik S. V. [Protection of solar arrays from electrical overloads: monograph] *Zakhyst Sonyachnykh Batarey vid Elektrichnykh Perevantazhen'*. Dnipro, Ltd. „AKTsENT PP”, 2018, 113 p. (Ukr)

16. Koltun M. M. [Optics and Metrology of Solar Elements] *Optika i Metrologiya Solnechnykh Elementov*, Moscow, Nauka, 1985, 280 p. (Rus)

17. Tonkoshkur A. S. [Schematic technologies for improving the reliability of renewable energy sources based on solar arrays using functional electronics elements]. *Mater. of the VII Int. Scientific-Practical Conference “Development of Business-Analytics, Accounting and Taxation in the Conditions of Globalization, Aggravation of Energy Problems”*, Ukraine, Dnipro, 2019, pp. 210–212. (Ukr)

18. Trusov V. A., Gusev A. M. [Elements of protection of electrical circuits against overvoltages and overcurrents]. *Proceedings of International Symposium “Reliability and Quality”*, 2011, vol. 2, pp. 221–224. (Rus)

Описание статьи для цитирования:

Иванченко А. В., Тонкошкур А. С. Изменения характеристик кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей после токовых перегрузок. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2019, № 3-4, с. 19–25. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.19>

Cite the article as:

Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Changes in the characteristics of silicon photovoltaic cells of solar arrays after current overloads. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 3-4, pp. 19-25. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.19>

Матяш І. Є., Мінайлова І. А., Міщук О. М., Руденко С. П., Стеценко М. О., Сердега Б. К. Фізика і техніка модуляційної поляриметриї: монографія.— Київ: Кафедра, 2018.

Монографія охоплює результати наукових та практичних досліджень явищ, пов'язаних з природною та штучною анізотропією діелектричних властивостей у твердих тілах, індукованою різноманітними внутрішніми та зовнішніми чинниками. У ній викладено значний обсяг результатів, отриманих за дослідження напівпровідникових кристалів та численних некристалічних матеріалів. Основну увагу зосереджено на явищах подвійного променезаломлення та дихроїзму, що супроводжують взаємодію лінійно поляризованого випромінювання з анізотропними матеріалами. Представлено виявлені особливості кінетики та динаміки термонапружень, індукованих радіаційними нагріваннями та охолодженнями, резонансних явищ нано- та макророзмірних об'єктах. Окремо викладено результати розроблення фізико-технічних основ модуляційної поляриметриї, яка характеризується підвищеною виявною та інформативною здатністю щодо вимірюваних величин. Показано, що отриманим результатам властива наукова та практична значимість у вигляді діагностичних засобів та сенсорних застосувань.

Для науковців-експериментаторів у галузях фізики, хімії, матеріалознавства, біології й медицини, дослідників та інженерів-виробничників, що спеціалізуються на розробці та діагностиці різноманітних технологічних процесів, а також викладачів фізико-технічних кафедр вищих навчальних закладів, аспірантів та студентів.



Д. т. н. А. О. ДРУЖИНІН, к. т. н. І. Й. МАР'ЯМОВА, к. т. н. О. П. КУТРАКОВ

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ СЕНСОРИ ДЕФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ ФОСФІДУ ГАЛІЮ

Проведено дослідження тензометричних характеристик ниткоподібних кристалів фосфіду галію р-типу провідності, легованих цинком. На основі цих кристалів створено сенсори деформації, працездатні в інтервалі деформацій $\pm 1,2 \cdot 10^{-3}$ відн. од. і широкому діапазоні температур — від 20 до 550°C.

Ключові слова: ниткоподібні кристали, фосфід галію, сенсори, деформація, температура.

З розвитком сучасних технологій і освоєнням нової продукції стають дедалі актуальнішими дослідження високотемпературних процесів. При цьому максимальна температура вимірюваного середовища може становити від 150 до 1500°C, а час впливу високотемпературного середовища — від секунд до десятків хвилин і кількох годин. Для сучасних сенсорів механічних величин характерним є застосування монокристалічного кремнію [1, 2], який серед інших матеріалів в найбільшій мірі узгоджується з існуючими мікроелектронними технологіями. У той же час для створення високотемпературних сенсорів механічних величин доцільно використовувати напівпровідникові матеріали з більшою, ніж у кремнію, шириною забороненої зони. Тому цілком закономірним є пошук інших напівпровідникових матеріалів і дослідження їхніх тензометричних властивостей [3, 4]. Зокрема, для створення високотемпературних тензорезистивних сенсорів механічних величин у деяких випадках використовується карбід кремнію [5], проте технологія отримання цього матеріалу досить складна, і тому предметом досліджень обрано кристали фосфіду галію як більш широкозонного напівпровідника.

З метою створення високотемпературних сенсорів деформації досліджувались тензометричні характеристики ниткоподібних кристалів (НК) GaP р-типу провідності з кристалографічною орієнтацією [111], яка співпадає з напрямком, в якому тензорезистивний ефект є максимальним для цього матеріалу. Ниткоподібні кристали фосфіду галію вирощувались методом газотранспортних реакцій у йодній системі. Як джере-

ло застосовувався полікристалічний фосфід галію, синтезований цим же методом з вихідних матеріалів. Для отримання ниткоподібних кристалів GaP температура зони випаровування становила 900—1050°C, а зони кристалізації — на 150—300°C нижче. Концентрація транспортного агента (йоду) не перевищувала 0,3 мг/см³, а швидкість при оптимальних умовах росту становила 50—100 мг/год. Вирощені кристали мають форму правильних три- чи шестигранних призм, витягнутих вздовж кристалографічного напрямку [111]. Провідність вирощених без спеціального легування НК GaP — електронна, для отримання кристалів з дірковою провідністю як легуюча домішка використовувався цинк.

Технологію створення омичних контактів до кристалів фосфіду галію і їхні властивості достатньо повно описано в [6], однак створення таких контактів до ниткоподібних кристалів має свою специфіку через їхню малу площу поперечного перерізу і умови роботи тензорезисторів. Тому було розроблено метод створення омичних контактів до НК GaP р-типу за допомогою срібної пасти, легованої цинком, з подальшим впалюванням пасти у кристал за температури 650°C. Отримані таким чином контакти є омичними і мають низький опір, проте для роботи за високих температур (400—600°C) потребують надійного захисту, який створюється шляхом осадження щільних шарів нікелю на срібло. Також розроблено методику створення контактів шляхом електрохімічного осадження золота на торці НК. Струмовиводи із золотого мікродроту приєднуються до НК або точковим зварюванням з верх-

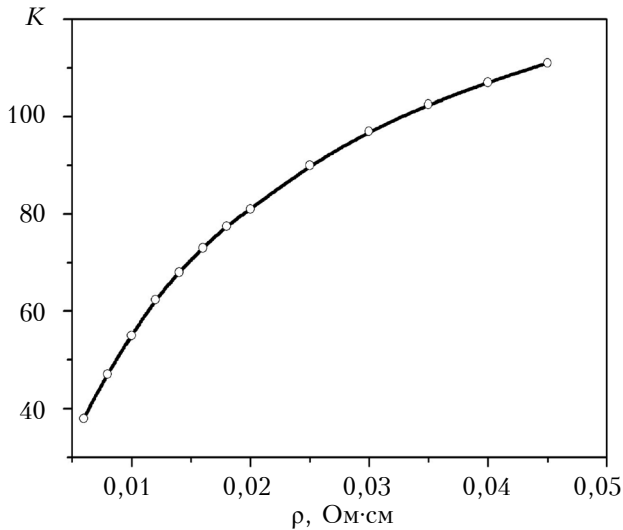


Рис. 1. Залежність коефіцієнта тензочутливості НК GaP *p*-типу від питомого опору при 20°C

нім шаром нікелю чи золота, або закріплюють-ся за допомогою срібної пасти.

Тензометричні характеристики НК GaP *p*-типу провідності досліджувались у широкому діапазоні температури (від 20 до 500°C) та деформації ($\epsilon = \pm 1,2 \cdot 10^{-3}$ відн. од.). Проведені дослідження показали, що поздовжній коефіцієнт тензочутливості K для НК GaP *p*-типу з орієнтацією [111] збільшується зі зростанням питомого опору (рис. 1), тобто зі зменшенням ступеня легування напівпровідникового матеріалу. Коефіцієнт тензочутливості цих кристалів при 20°C достатньо великий, зокрема для НК з питомим опором 0,025–0,03 Ом·см величина K знаходиться в межах 90–95. Як видно з рис. 2, у діапазоні зміни ϵ від 0 до

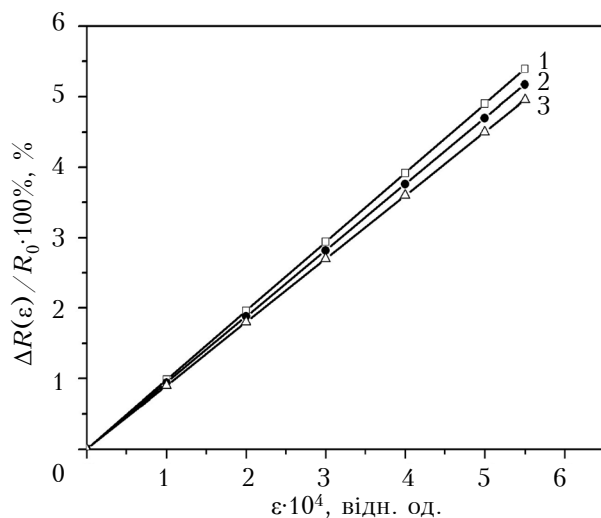


Рис. 2. Залежність відносної зміни опору від деформації розтягування для НК GaP *p*-типу з різним питомим опором (в Ом·см):

1 – 0,030; 2 – 0,025; 3 – 0,023

$5 \cdot 10^{-4}$ відн. од. для цих кристалів спостерігається лінійна залежність опору від деформації (точніше, відносної зміни опору $\Delta R(\epsilon)/R_0$, де $\Delta R(\epsilon) = R(\epsilon) - R_0$; R_0 – початковий опір НК).

Для створення високотемпературних сенсорів деформації найбільшу увагу було приділено дослідженню впливу температури на тензометричні характеристики НК GaP. На рис. 3 для незакріплених кристалів GaP *p*-типу з різним питомим опором наведено отримані температурні залежності відносної зміни опору $\Delta R(T)/R(20^\circ\text{C})$, де $\Delta R(T) = R(T) - R(20^\circ\text{C})$. У всій дослідженій області температури спостерігалась домішкова провідність. Поява мінімуму на температурній залежності відносної зміни опору для зразків з питомим опором $\rho = 0,01\text{--}0,08$ Ом·см зумовлена переходом від розсіювання носіїв струму на домішках до розсіювання на теплових коливаннях ґратки. Зазначимо, що характер отриманих температурних залежностей опору мікрокристалів GaP узгоджується з даними щодо температурної залежності електропровідності об'ємних монокристалів, легованих цинком [7].

Закріплення кристалів GaP на матеріалах, коефіцієнт термічного розширення яких більший, ніж у фосфіду галію ($\alpha = 5,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$), наприклад на сталі, зумовлює виникнення термічної деформації $\epsilon_T < 0$, яка призводить до зменшення опору кристалів у порівнянні з вільними кристалами, а також до зростання температурної залежності опору. Температурний коефіцієнт опору НК GaP *p*-типу з питомим опором 0,03 Ом·см, закріплених на сталевій балці, становить приблизно $+0,25\%/^\circ\text{C}$ у температурному діапазоні від 200 до 400°C.

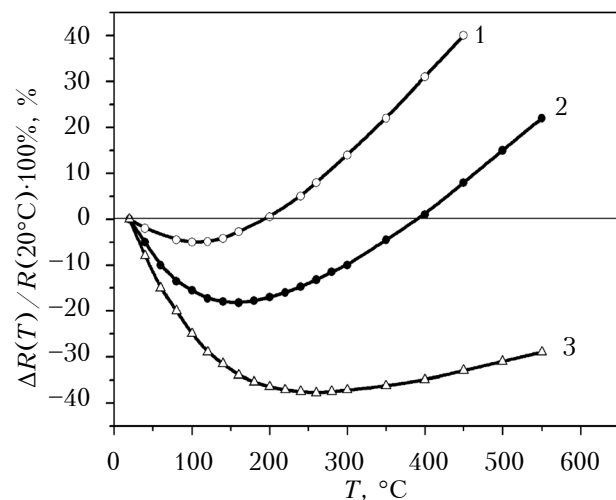


Рис. 3. Залежність відносної зміни опору від температури для НК GaP *p*-типу з різним питомим опором (в Ом·см):

1 – 0,01; 2 – 0,04; 3 – 0,08

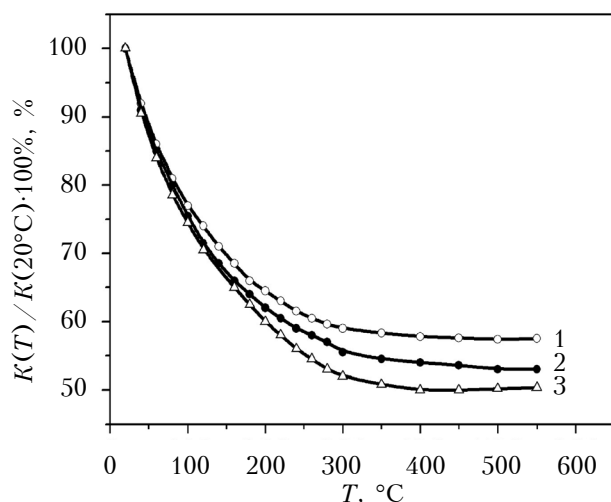


Рис. 4. Температурна залежність відносної величини коефіцієнта тензочутливості НК GaP *p*-типу з різним питомим опором (в Ом·см):
1 — 0,030; 2 — 0,025; 3 — 0,023

На величину коефіцієнта тензочутливості кристалів фосфіду галію досить істотно впливає температура навколишнього середовища. Проведені дослідження показали, що для закріплених кристалів GaP *p*-типу з $\rho = 0,01 - 0,03$ Ом·см коефіцієнт тензочутливості помітно зменшується з підвищенням температури від 20 до 300°C і майже не змінюється в інтервалі 300–550°C (рис. 4), де температурний коефіцієнт тензочутливості не перевищує $-0,03\%/^{\circ}\text{C}$. Величина коефіцієнта тензочутливості НК GaP *p*-типу в області температур від 300 до 500°C для цих кристалів дорівнює 40–50.

На рис. 5 наведено градувальні характеристики розроблених сенсорів деформації в діапазоні температур 20–550°C. Слід зазначити, що у всьому досліджуваному діапазоні температур сенсори на основі НК GaP *p*-типу з питомим опором з 0,003–0,03 Ом·см мають лінійну залежність опору від деформації стискування та розтягування в області $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ відн. од.

Вирощені НК GaP можна безпосередньо використовувати як чутливі елементи тензорезисторів, оскільки вони мають необхідні для цього розміри, а їхня поверхня не потребує додаткової механічної обробки. Розроблена технологія створення високотемпературних напівпровідникових тензорезисторів на основі НК GaP *p*-типу методом газотранспортних реакцій характеризується достатньою простотою, відсутністю трудомістких технологічних операцій і достатньо великим відсотком використання напівпровідникового матеріалу, причому як вихідний матеріал використовується полікристалічний фосфід галію, синтезований з відповідних складових. Ніякі інші технологічні методи не можуть за-

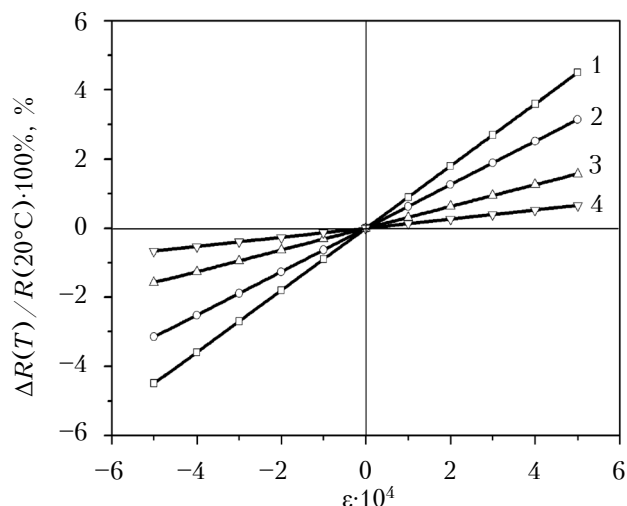


Рис. 5. Градувальні характеристики сенсорів деформації на основі НК GaP *p*-типу за різних температур (в °C):
1 — 20; 2 — 100; 3 — 300; 4 — 550

Основні параметри розроблених сенсорів на основі НК GaP *p*-типу провідності

Параметр	Значення
Розміри, мкм:	
— ширина грані	20–40
— товщина	20–40
— довжина	4–10
Питомий опір, Ом·см	0,02–0,03
Опір при 20°C, Ом	150–600
Температурний коефіцієнт опору, $\%/^{\circ}\text{C}$	+(0,15–0,17)
Коефіцієнт тензочутливості при 20°C	+(80–95)
Температурний коефіцієнт тензочутливості, $\%/^{\circ}\text{C}$	–(0,02–0,03)
Робочий діапазон температур, °C	20–550
Максимальна відносна деформація, %	0,5–0,8

безпечити таку високу структурну досконалість чутливих елементів тензорезисторів, а отже, і їхню високу механічну міцність.

Основні характеристики розроблених тензорезисторів на основі НК GaP *p*-типу наведені у таблиці.

Отже, за своїми тензометричними характеристиками за підвищених температур, механічними властивостями та розмірами НК GaP *p*-типу провідності з орієнтацією [111] є придатними для створення високотемпературних сенсорів деформації. Проведені вимірювання показали можливість роботи сенсорів на осно-

ві НК GaP у статичних та динамічних режимах при циклічній деформації. Вони витримують не менше ніж 10^8 циклів знакозмінної деформації $\epsilon = \pm 5 \cdot 10^{-4}$ відн. од. без руйнування і зміни характеристик.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Козин С. А., Федулов А. В., Пауткин В. Е., Баринов И. Н. Микроэлектронные датчики физических величин на основе МЭМС-технологии // Компоненты и технологии. — 2010. — № 1. — С. 24–27.
2. Дружинин А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С. Ниткоподібні кристали кремнію для сенсорної електроніки // Фізика і хімія твердого тіла. — 2011. — Т. 12, № 4. — С. 1078–1084.
3. Шварц Ю. М. Фізичні основи напівпровідникових приладів екстремальної електроніки / Дис. ... д-ра фіз.-мат. наук. — Київ: ІНФ ім. В. Є. Лашкарьова, 2004.

4. Анотин Е. А. Высокотемпературные приборы на основе фосфида галлия: эпитаксиальная технология, концепция легирования, электрические свойства / Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Санкт-Петербург: ФТИ им. А. И. Иоффе РАН, 2009.

5. Михайлов П. Г. Исследования по созданию высокотемпературных сенсорных элементов и структур // Микросистемная техника. — 2004. — № 8. — С. 38–44.

6. Дружинин А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П. Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук A_3B_5 . — Львів: Вид. Львівська політехніка, 2015. — 232 с.

7. Радауцан С. И., Максимов Ю. И., Негрескул В. В., Пышкин С. Л. Фосфид галлия. — Кишинев: Ин-т прикл. физики, 1969.

Дата надходження рукопису
до редакції 30.05 2019 р.

DOI: 10.15222/TKEA2019.3-4.26
УДК 625.315.592

А. О. ДРУЖИНИН, И. И. МАРЬЯМОВА, А. П. КУТРАКОВ
Украина, Национальный университет «Львовская политехника»
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДАТЧИКИ ДЕФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

Проведено дослідження тензометричних характеристик нитевидних кристаллов фосфида галлия p-типа проводимости, легированных цинком. На основе этих кристаллов созданы сенсоры деформации, работоспособные в интервале деформаций $\pm 1,2 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. и широком диапазоне температур от 20 до 550°C.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, фосфид галлия, сенсор, деформация, температура.

DOI: 10.15222/TKEA2019.3-4.26
UDC 625.315.592

A. O. DRUZHININ, I. I. MARYAMOVA, O. P. KUTRAKOV
Ukraine, Lviv Polytechnic National University
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

HIGH TEMPERATURE STRAIN SENSORS BASED ON GALLIUM PHOSPHIDE WHISKERS

The paper presents a study of tensoresistive characteristics of p-type GaP whiskers with [111] crystallographic orientation coinciding with the direction of the maximal piezoresistive effect for this material. The authors present a newly-developed technology of creating the ohmic contacts to GaP crystals that allows using these crystals at high temperatures (400–600°C). Tensoresistive characteristics of p-type GaP whiskers were studied in the strain range of $\pm 1,2 \cdot 10^{-3}$ rel. un. These studies show that the gauge factor for these crystals at 20°C is rather large. Thus, for p-type GaP crystals with a resistivity of 0.025–0.03 $\Omega \cdot \text{cm}$, the gage factor is in the range of 90–95.

The study of tensoresistive properties shows that in the temperature range of 20–300°C for p-type GaP crystals with the resistivity of 0,01–0,03 $\Omega \cdot \text{cm}$, the gage factor decreases as the temperature rises, but in the temperature range of 300–550°C for this crystals, very slight temperature dependence of the gage factor was observed. In this temperature range, the temperature coefficient of gage factor is no more than $-0,03\% / ^\circ\text{C}$. In the temperature range of 300–500°C, the value of gage factor is high (40–50). It could be noticed that in the entire investigated temperature range, the strain sensors based on p-type GaP whiskers have the linear resistance vs. strain dependence in the strain range of $\pm 5,0 \cdot 10^{-4}$ rel. un. The developed strain sensors based on p-type GaP whiskers have high mechanical strength at the static and dynamic strain (more than 10^8 cycles), which makes them operable in dynamic mode.

Keywords: whiskers, gallium phosphide, sensor, deformation, temperature.

REFERENCES

1. Kozin, S. A., Fedulov A.V., Pautkin V.Ye., Barinov I.N. [Microelectronic sensors of physical quantities based on MEMS technology]. *Components & Technologies*, 2010, no. 1, pp. 24–27. (Rus)
2. Druzhinin A., Maryamova I., Kuttrakov A., Liakh-Kaguy N. Silicon whiskers for sensor electronics. *Physics and Chemistry of Solid State*, 2011, vol. 12, no. 4, pp. 1078–1084. (Ukr)
3. Shvarts Yu.M. *Fizychni osnovy napivprovidnykovykh pryladiv ekstremal'noyi elektroniky*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Physical basics of semiconductor devices of extreme electronics. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Kyiv, V.Ye. Lashkaryov ISP, 2004. (Ukr)
4. Anyutin E.A. *Vysokotemperaturnyye pribory na osnove fosfida galliya: epitaksial'naya tekhnologiya, kontseptsiya legirovaniya, elektricheskiye svoystva*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Gallium phosphide-based high-temperature devices: epitaxial technology, alloying concept, electrical properties. Dr. phys. and math. sci. diss.]. St Petersburg, Ioffe Institute, 2009.
5. Mikhailov P.G. [Research on the creation of high-temperature sensor elements and structures]. *Microsystem Technology*, 2004, no. 8, pp. 38–44. (Rus)
6. Druzhinin A.O., Mar'yamova I.Y., Kuttrakov O.P. *Datchyky mekhanichnykh velychyn na osnovi nytkopodibnykh krystaliv kremniyu, hermaniyu ta spoluk A_3B_5* [Sensors of mechanical quantities based on whiskers of silicon, germanium and A_3B_5 compounds]. Lviv, Publishing house Lviv Polytechnic, 2015, 232 p. (Ukr)
7. Radautsan S.I., Maksimov YU.I., Negreskul V. V., Pyshkin S.L. *Fosfid galliya* [Gallium phosphide]. Chisinau, Institute of Applied Physics, 1969, 123 p. (Rus)

Опис статті для цитування:

Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П. Високотемпературні сенсори деформації на основі ниткоподібних кристалів фосфиду галію. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2019, № 3-4, с.26–30. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.26>

Cite the article as:

Druzhinin A. A., Maryamova I. I., Kuttrakov A. P. High temperature strain sensors based on gallium phosphide whiskers, *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2019, no. 3-4, pp. 26-30. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.26>

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

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

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



*Dr. Sc. V. P. MAKHNIY, Ph. D. M. M. BEREZOVSKIY,
Ph. D. O. V. KINZERSKA, Ph. D. V. V. MELNYK*

Ukraine, Yuri Fedkovych Chernivtsy National University
E-mail: oksanakinzerska@gmail.com, vpmakhniy@gmail.com

SURFACE ZnSe:Ca LAYERS WITH HOLE CONDUCTIVITY

The authors investigate the effect of treating n-ZnSe substrates with boiling aqueous $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ suspension on their electrical and luminescent properties. Base substrates were cut from bulk pure zinc selenide crystals grown from a stoichiometric melt by the Bridgman method. It was found that the Ca-doping of the substrates causes an almost complete “quenching” of the low-energy orange emission band with a maximum near $\hbar\omega_{\max} \approx 1.95$ eV and a significant increase in the efficiency of the edge blue luminescence band.

Keywords: zinc selenide, p-type conductivity, ionization energy, concentration, luminescence.

Despite the fact that zinc selenide has all the necessary physical and technological parameters for creating devices and instruments for short-wave electronics, this material still remains outside the scope of mainstream research. The main reason for this is that obtaining crystals and (or) layers with hole conductivity and preferential edge luminescence in the room temperature range is technologically difficult [1]. This is due to the large number of intrinsic and uncontrollable impurity defects, as well as the tendency of II–VI compounds to self-compensate, which ultimately leads to preferential electron conductivity of ZnSe [2]. Moreover, a theoretical analysis of the defect formation mechanisms in cadmium and zinc sulfoselenides allowed the authors of [3] to determine the temperature value (700 K), above which it is impossible to obtain impurity hole conductivity in these materials using traditional equilibrium methods. In such a case, therefore, p-type layers must be created by lower-temperature nonequilibrium methods — laser annealing, ion implantation, annealing in activated chalcogen vapors (or a combination thereof) [2]. A significant breakthrough in obtaining p-ZnSe was made by the authors of [4, 5], who suggested doping ZnSe layers created by molecular-beam epitaxy with nitrogen, activated by a radio-frequency discharge. It is this technology that made it possible to create the first blue-green laser structures based on II–VI compounds [6].

Further studies have shown that the efficiency of doping with the desired type of impurity (ac-

ceptor or donor) can be significantly improved by the simultaneous introduction of an opposite type of impurity [7, 8]. On the other hand, the end result of this co-doping is difficult to predict, since the complex process of defect formation depends on many factors, i.e., the technology for producing the base material and the ensemble of point defects, the method and mode of introducing compensating impurities, as well as their type and combinations. etc. In this regard, all the methods discussed above are far from simple, hard to predict theoretically, require complex and expensive equipment, as well as extra annealing of defects created due to the exposure to laser or ion fluxes.

With this in mind, doping these compounds with isovalent impurities (IVIs) exhibiting a significantly different behavior from that of typical donor and acceptor impurities [4, 5, 9] may be promising. One of the features of an IVI is that it generates its intrinsic point defects (IPD) of a certain type, not always creating their own local levels in the forbidden zone of the semiconductor. The type of IPD (donor or acceptor) determined by the electronegativity factor X_{IVI} and the atom of a semiconductor compound replacing it, and the concentration of the resulting IPD can be commensurate with the concentration of the introduced IVI [6]. Using the results of [5, 6], we can conclude that inequation $X_{\text{IVI}} < X_{\text{Zn}}$ must be fulfilled to generate self-defective acceptor centers. This condition is true for a number of elements from group II of the periodic table (Be, Mg, Ca, Ba), whose integration into the cationic (zinc) ZnSe sublattice

stimulates the appearance of additional zinc vacancies V_{Zn} and interstitial selenium Se_i . Our choice of calcium as an IVI is based on the fact that the difference in the electronegativities of Ca and Zn are fairly strong [5], and the solubility of calcium salts in water is the highest compared to similar salts of the other elements mentioned above [10].

Another feature of the IVI is an increase in the edge radiation efficiency, whether the energy zone structure is direct or indirect [11, 12]. This effect, in particular, is observed experimentally in single-crystal CdTe and ZnSe substrates doped with group II elements with magnesium and calcium [7, 15]. Note that, regardless of the type of IVI used (Mg and Ca) and the method of its introduction (vapor phase or solution), the luminescence spectra is dominated by the edge emission band at a doped substrates temperature of 300 K. In our opinion, the conclusions the authors of these works made about the hole conductivity of the obtained layers was not sufficiently substantiated.

Thus, in this study, we analyzed the electro-physical properties of the ZnSe:Ca diffusion layers, using the above-considered mechanisms for the formation of acceptor centers and the determination of their main parameters.

Samples and research methods

The substrates were $4 \times 4 \times 1$ mm plates cut from a bulk ZnSe crystal grown from a stoichiometric composition melt. In the room temperature range,

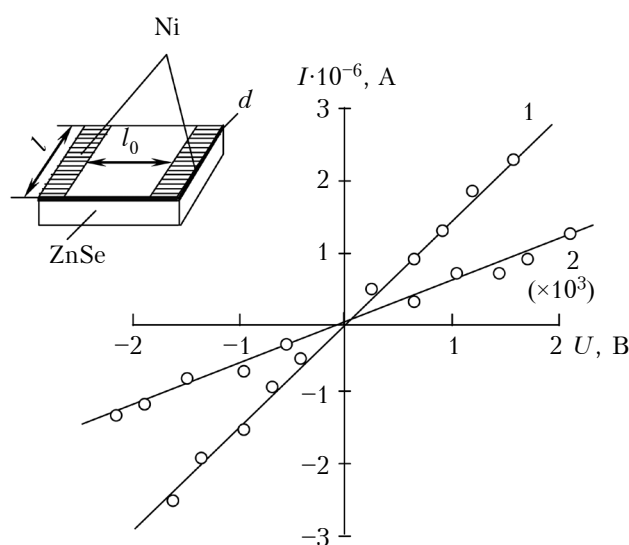


Fig. 1. $I - V$ characteristics of the ZnSe:Ca layer with Ni contacts (1) and the substrate with In contacts (2) obtained at 300 K

(insert presents a schematic drawing of the substrate after annealing)

the substrates had a weak electronic conductivity of $\sigma_p \approx 10^{-9} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Before doping, the plates underwent mechanical and chemical polishing in solution $\text{CrO}_3:\text{HCl} = 2:3$, which gave their surface a mirror-like aspect. Doping was carried out by an hour-long annealing of the substrates in a boiling aqueous suspension of the $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ salt. After that, their surface layers changed the electron conductivity to the hole one, which is confirmed by the signs of thermoelectric power and by the fact that the contact becomes rectifying. Then, Ni was sprayed onto one of the large sides of the plates in strips, which served as ohmic contacts (OC) to the final layer. A schematic representation of the substrates that have passed the stage of annealing and OC deposition is shown in Fig. 1 (see insert).

The linearity and symmetry of the current-voltage characteristics ($I - V$) shown in Fig. 1 of the Ni contacts confirms their resistivity and the hole conductivity of the obtained layers (for clarity, the values of the parameters of dependence 2 are multiplied by 10^3). At the same time, similar contacts to n -ZnSe substrates have non-linear $I - V$ characteristics, which indicates the presence of a potential barrier between nickel and zinc selenide layers. Meanwhile, the above experimental facts are not at all consistent with any of the metal-semiconductor contact models (Schottky or Bardeen) [16], which calls for additional research beyond the scope of this work. Fortunately, this does not prevent us from determining a number of parameters of the obtained layers, in particular, the ionization energy E_a and concentration N_a of electrically active acceptor centers. The former can be found from the temperature dependence of the specific conductivity.

Electronic conductivity σ_p or resistance ρ_p are related to the concentration p_0 and mobility μ_p of equilibrium holes by a simple ratio [17]

$$\sigma_p = 1/\rho_p = e\mu_p p_0. \quad (1)$$

Note that the dependency $\sigma_p(T)$ is actually determined by the stronger dependence of the factors in (1) that vary with temperature according to the law [17]

$$\mu_p(T) \sim T^m; p_0 \sim T^{3/2} \exp(-E_a/(nkT)). \quad (2)$$

Here m changes from $-3/2$ to $3/2$ depending on the scattering mechanism, and $n=1$ or $n=2$ for a strongly or slightly compensated semiconductor. Note also that in our case it is much easier to

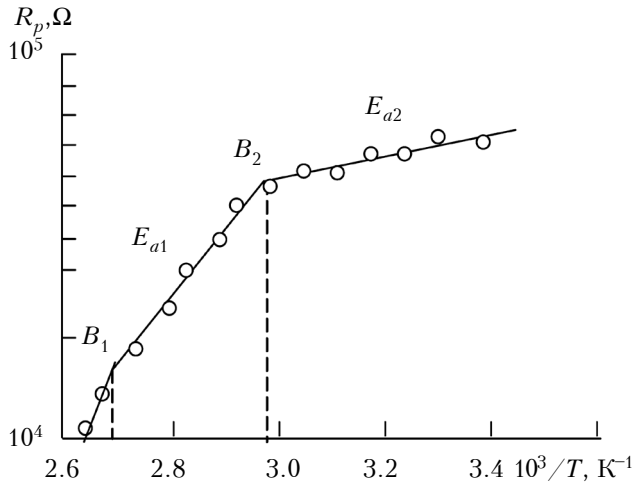


Fig. 2. Temperature dependence of the ZnSe:Ca diffusion layer resistance

measure the resistance of the layer R_p , which then allows you to easily calculate ρ_s (or σ_s) according to the formula

$$\rho_p = 1/\sigma_p = R_p s/l = R_p l_0 d/l, \quad (3)$$

l, d — length and thickness of the diffusion layer;

l_0 — width of the Ni contact (see the insert in Fig. 1).

The correctness of this approach is due to the fact that the diffusion p -layer is isolated from the substrate by an n -ZnSe i -layer with the lowest possible conductivity, which electrically unties them. The ionization energy of electrically active centers in the p -layer can be found using expressions (1) and (2), assuming that $\sigma_p(T)$ is determined mainly by the exponential factor, i. e., actually by $p_0(T)$. This is confirmed by the data in **Fig. 2**, which shows that the experimental dependencies $R_p(T)$, plotted in coordinates $\ln R_p - 10^3/T$, are straight lines with the energy slope corresponding to the E_a slope. The calculated values of the activation energies with regard to the weakly compensated p -layer are given in **Table** and correlate with the depth of the acceptor levels of alkali metal impurities $E_a \approx 110 - 120$ meV and singly charged zinc vacancies V'_{Zn} from $E_a \approx 150 - 200$ meV [2, 17]. The uncontrolled alkali metal impurities are likely to be present in small quantities in the $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ salt.

Using the parameters at the break points B_1 and B_2 on the curve of $R_p(T)$ dependence at which the Fermi level crosses the level of the corresponding center, we can determine the concentration of electrically active acceptor centers using the formula [17]

$$N_a = N_v \exp(-E_a / (kT_B)). \quad (4)$$

Effective density of state in the N_v valence band is easily calculated by the formula

$$N_v = 2(2\pi m_p^* kT / h^2)^{3/2}. \quad (5)$$

If we know that, for ZnSe, $m_p^* = 0,6m_0$ [2], we can calculate that $N_v \approx 8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (for 300 K). We can then find N_a , given its dependence on T and the corresponding E_a and T_B values (see Table 1). Due to the absence of a horizontal plot on the graph of the dependence $R_p(T)$ corresponding to the “depletion” of the acceptor center, the free holes concentration should be calculated by the formula

$$p_0 \approx \sqrt{N_v N_{a1} / 2} \cdot \exp(-E_{a1} / (2kT)). \quad (6)$$

Substituting the required values of N_v , N_{a1} , E_{a1} and $T = 300$ K into formula (6), we find that $p_0 \approx 8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, which, given the hole mobility $\mu_p \approx 30 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ [2], leads to the conductivity value $\sigma_p \approx 4 \text{ } \Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$. The diffusion layer thickness is easy to find by substituting the experimental and calculated parameters l, l_0, R_p and σ_p into expression (3). For this sample, the diffusion layer thickness was determined to be approximately $0.15 \text{ } \mu\text{m}$.

In conclusion, we note that a sufficiently high hole conductivity of the obtained layers cannot be due to the new chemical compound formed as a result of treatment in the $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ aqueous suspension. This is confirmed by a number of experimental facts. Firstly, the differential reflection spectra of the base and doped ZnSe substrates are identical, which indicates that their energy band structures are the same [15]. Secondly, there is a B band in the photoluminescence spectra of ZnSe:Ca layers, the shape and energy position of which are similar to the edge emission band of the base

The main parameters of p -ZnSe:Ca layers

Parameter	E_{a1} , meV	E_{a2} , meV	T_{B1} , K	T_{B2} , K	N_{a1} , cm^{-3}	N_{a2} , cm^{-3}	p_0 , cm^{-3}	d , μm
Value	110	200	320	380	$1,6 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{17}$	$8 \cdot 10^{17}$	0,15

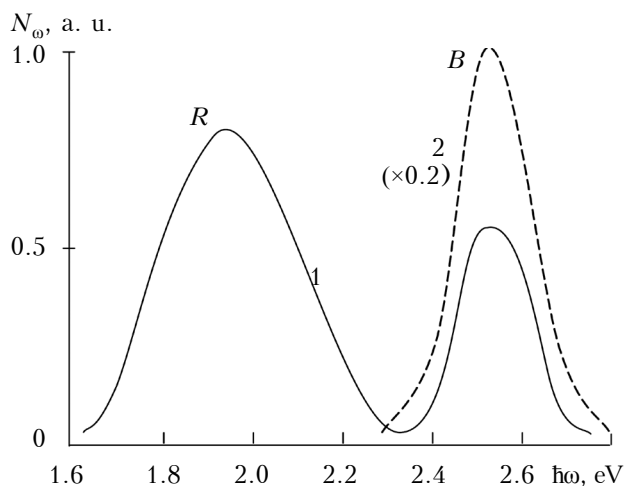


Fig. 3. Luminescence spectra of base (1) and Ca-doped (2) n -ZnSe substrates obtained at 300 K

substrates (Fig. 3, for clarity, the values of the parameters of dependence 2 are multiplied by 0.2).

Of particular practical interest is the fact that, in doped samples, the B -band is dominant, and its efficiency at 300 K is almost an order of magnitude greater than it is in base substrates (see Fig. 3). Therefore, we can assume that the observed transformation of the emission spectra is associated with the rearrangement of an ensemble of point defects in ZnSe, caused by the introduction of Ca impurity. We also draw attention to the fact that the exciting radiation of the N_2 -laser ($\lambda_m \approx 0,337 \mu\text{m}$) penetrates to a depth of less than $0.1 \mu\text{m}$, as a result of which it does not excite the luminescence in the base substrate and the observed emission spectrum is actually determined by the ZnSe:Ca layer diffusion (curve 2 in Fig. 3).

Conclusion

Thus, the research results convincingly indicate the possibility of creating p -type surface layers on n -ZnSe substrates by annealing them in a boiling aqueous suspension of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ salt. In this case, the conductivity is controlled by acceptor centers with activation energy values of 0.11 eV and 0.2 eV and estimated concentration of 10^{18} and $3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, respectively. The presence of an effective edge emission band at 300 K in the luminescence spectra of ZnSe:Ca layers is also practically important. Further research, in our opinion, should be focused on studying the mechanisms of defect formation and luminescence, as well as directly determining the thickness of diffusion ZnSe:Ca layers and holes in them.

REFERENCES

- Georgobiani A. N., Kotlyarevsky M. B. Problems of creating injection LEDs based on wide-band $A^{II}B^{VI}$ semiconductor compounds. *Izvetiya Akademii Nauk SSSR, Ser. Fizika*, 1985, vol. 49, no. 10, pp. 1916–1922. (Rus)
- Fizika soyedineniy $A^{II}B^{VI}$ [Physics of $A^{II}B^{VI}$ compounds]. Ed. by A. N. Georgobiani, M. K. Sheykman. Moscow, Mir, 1986, 390 p. (Rus)
- Georgobiani A. N., Kotlyarevsky M. B., Mikhaleenko V. N. [Properly defective luminescence centers in ZnS p -types]. *Trudy FIAN*, Moscow, Nauka, 1983, no. 138, pp. 70–135. (Rus)
- Park R. M., Troffer M. B., Roulean C. M. et al. P-type ZnSe by nitrogen atom beam doping during molecular beam epitaxial growth. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, vol. 57, no. 20, pp. 2127–2129.
- Ohkawa K., Karasawa T., Mitsuyu T. Characteristics of p -type layers grown by MBE with radical doping. *Jap. J. Appl. Phys.*, 1991, vol. 30, no. 2A, pp. L152–L155.
- Haase M. A., Qiu J., DePuydt J. M., Cheng H. Blue-green laser diodes. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, vol. 59, no. 1, pp. 1272–1274.
- Fistul V. I. *Impurities in Semiconductors: Solubility, Migration and Interactions*. CRC Press, 2004, 448 p.
- Zhang J., Tse K., Wong M. et al. A brief review of co-doping. *Front. Phys.*, 2016, vol. 11, no. 6, pp. 117405–1–117405–21.
- Ran F.-Y., Xiao Z., Toda Y. et al. N-type conversion of SnS by isovalent ion substitution: Geometrical doping as a new doping route. *Sci. Rep.*, 2015, 5:10428, pp. 1–8.
- Kratkiy katalog khimii [Brief directory of chemistry]. Ed. by O. D. Kurilenko. Kyiv, Naukova Dumka, 1974, 991 p. (Rus)
- Makhniy V. P. *Fizyka ta khimiya tochkovykh defektiv u napivprovodnykakh* [Physics and chemistry of point defects in semiconductors]. Chernivtsi, Chernivtsi National University, 2014, 216 p. (Ukr)
- Dmitriyev Yu. N., Ryzhikov V. D., Galchinetsky L. P. *Termodinamika izovalentnogo legirovaniya kristallov poluprovodnikovoykh soyedineniy tipa A^2B^6* [Thermodynamics of isovalent doping of A^2B^6 semiconductor compounds]. Kharkiv, State Scientific Institution "Institute for Single Crystals", 1990, pp. 50 p. (Rus)
- Slyotov M. M., Kosolovsky V. V., Slyotov A. M., Ulyanitsky K. S. [Sensors with isovalent impurities]. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2011, vol. 8, no. 2, pp. 76–80. (Rus)
- Slyotov M. M., Herman I. I., Slyotov O. M., Kosolovsky V. V. [Properties of ZnSe and CdTe doped with isovalent impurity Ca]. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2012, vol. 9, no. 3, pp. 92–96. (Ukr)
- Makhniy V. P. *Fizyka kontaktnykh yavlyshch u napivprovodnykakh* [Physics of contact phenomena in semiconductors]. Chernivtsi, Chernivtsi National University, 2015, 262 p. (Ukr)
- Oreshkin P. T. *Fizika poluprovodnikov i dielektrikov* [Physics of semiconductors and dielectrics]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1977, 448 p. (Rus)
- Tkachenko I. V. [Mechanisms of defect formation and luminescence in immobilized and doped tellurium zinc selenide crystals]. Dis. ... kand. phys.-math. sciences. Chernivtsi, Yuri Fedkovych Chernivtsy National University, 2005, 132 p.

Received 09.04 2019

DOI: 10.15222/TKEA2019.3-4.31
УДК 537.32

Д. ф.-м. н. В. П. МАХНИЙ, к. ф.-м. н. М. М. БЕРЕЗОВСКИЙ,
к. ф.-м. н. О. В. КИНЗЕРСКА, к. ф.-м. н. В. В. МЕЛЬНИК

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
E-mail: oksanakinzerska@gmail.com, vpmakhniy@gmail.com

ПОВЕРХНЕВІ ШАРИ ZnSe:Ca З ДІРКОВОЮ ПРОВІДНІСТЮ

Досліджено вплив обробки підкладок n -ZnSe в киплячій водній суспензії солі $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ на їхні електричні та люмінесцентні властивості. Базові підкладки вирізались з об'ємних бездомішкових кристалів селеніду цинку, вироєних методом Бріджмена із розплаву стехіометричного складу. Встановлено, що обробка призводить до появи діркової провідності поверхневих шарів підкладок, величина якої за 300 К складає $\sigma_p \approx 4 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$. Значення енергії іонізації електрично активних акцепторних центрів, знайдені з температурної залежності опору R_p легуваного кальцієм шару селеніду цинку, дорівнюють $E_{a1} \approx 0,11 \text{ еВ}$ та $E_{a2} \approx 0,2 \text{ еВ}$. Значення їхніх концентрацій, розраховані з врахуванням характерних точок зламу на графіку залежності $R_p(T)$, складають для відповідних центрів $N_{a1} \approx 1,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ та $N_{a2} \approx 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Оціночна концентрація вільних дірок в отриманих шарах за 300 К дорівнює $p_0 \approx 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Встановлено, що легування підкладок кальцієм викликає практично повне «гасіння» низькоенергетичної помаранчевої смуги випромінювання з максимумом поблизу $\hbar\omega_{\text{max}} \approx 1,95 \text{ еВ}$ і значне збільшення ефективності крайової блакитної смуги люмінесценції.

Ключові слова: селенід цинку, діркова провідність, енергія іонізації, концентрація, люмінесценція.

DOI: 10.15222/TKEA2019.3-4.31
УДК 537.32

Д. ф. -м. н. В. П. МАХНИЙ, к. ф. -м. н. М. М. БЕРЕЗОВСКИЙ,
к. ф. -м. н. О. В. КИНЗЕРСКАЯ, к. ф. -м. н. В. В. МЕЛЬНИК

Украина, Черновицкий национальный университет
имени Юрия Федьковича
E-mail: oksanakinzerska@gmail.com, vpmakhniy@gmail.com

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СЛОИ ZnSe:Ca С ДЫРОЧНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

Исследовано влияние обработки подложек n -ZnSe в кипящей водной суспензии соли $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ на их электрические и люминесцентные свойства. Базовые подложки вырезались из объемных беспримесных кристаллов селенида цинка, выращенных методом Бриджмена из расплава стехиометрического состава. Установлено, что обработка приводит к появлению дырочной проводимости поверхностных слоев подложек, величина которой при 300 К составляет $\sigma_p \approx 4 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$. Значения энергии ионизации электрически активных акцепторных центров, найденные из температурной зависимости сопротивления R_p легированного кальцием слоя селенида цинка, равны $E_{a1} \approx 0,11 \text{ эВ}$ и $E_{a2} \approx 0,2 \text{ эВ}$. Значения их концентраций, рассчитанные с учетом характерных точек излома на зависимости $R_p(T)$, составляют для соответствующих центров $N_{a1} \approx 1,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $N_{a2} \approx 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Оценочная концентрация свободных дырок в полученных слоях при 300 К равна $p_0 \approx 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Установлено, что легирование подложек кальцием вызывает практически полное «гашение» низкоэнергетической оранжевой полосы излучения с максимумом вблизи $\hbar\omega_{\text{max}} \approx 1,95 \text{ эВ}$ и значительное увеличение эффективности краевой голубой полосы люминесценции.

Ключевые слова: селенид цинка, дырочная проводимость, энергия ионизации, концентрация, люминесценция.

Опис статті для цитування:

Makhniy V. P., Berezovskiy M. M., Kinzerska O. V., Melnyk V. V. Surface ZnSe:Ca layers with hole conductivity. Технологія і конструювання в електронній апаратурі, 2019, № 3-4, с. 31–35. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.31>

Cite the article as:

Makhniy V. P., Berezovskiy M. M., Kinzerska O. V., Melnyk V. V. Surface ZnSe:Ca layers with hole conductivity. Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature, 2019, no. 3-4, pp. 31–35. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.31>

А. В. МАМЫКИН, д. ф.-м. н. А. Л. КУКЛА, Л. М. МАТВИЕНКО, А. В. ДОРОЖИНСКАЯ,
д. т. н. В. П. МАСЛОВ, к. т. н. Г. В. ДОРОЖИНСКИЙ

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины
E-mail: kukla@isp.kiev.ua

ВЫСОКОИНФОРМАТИВНЫЙ КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА МОТОРНОГО МАСЛА

Экспериментально показано наличие корреляционных зависимостей между типом моторного масла и его рефрактометрическими и электрофизическими характеристиками (коэффициентом преломления, удельным сопротивлением и диэлектрической проницаемостью). Предложены способы определения типа моторного масла, основанные на измерении указанных характеристик, а также прототипы портативных измерительных устройств, реализующие эти способы. Показано, что точность идентификации типа моторного масла значительно увеличивается при одновременном учете указанных физических характеристик.

Ключевые слова: импедансная спектроскопия, поверхностный плазмонный резонанс, моторное масло, удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость, коэффициент преломления.

Моторное масло (ММ) является одним из основных функциональных элементов двигателя внутреннего сгорания (ДВС), определяющим его непосредственную работу, износ деталей и срок эксплуатации. Это, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к качеству и соответствию ММ заявленным производителем эксплуатационным характеристикам, оперативный контроль которых позволяет наиболее эффективно проводить эксплуатацию ДВС. Основными критериями качества выпускаемого ММ являются значения его кинематической вязкости, соответствующие работе ДВС в различных температурных режимах: при запуске и в режиме прогретого двигателя. Выделяют минеральные, полусинтетические и синтетические масла с соответствующей классификацией кинематической вязкости по SAE (Society of Automotive Engineers): 15W-40, 10W-40 и 5W-30.

Стандартные вискозиметрические методы контроля кинематической вязкости (ISO 3104-94 и др.) не удовлетворяют критериям проведения экспрессного анализа, поскольку трудно поддаются автоматизации, требуют значительных объемов проб, затратны по времени и используют габаритное оборудование. Экспрессные методы контроля ММ связаны, как правило, с нахождением корреляционных зависимостей между интересующей эксплуатационной характеристикой и некоторым физическим параметром, который можно оперативно измерить. Для оперативного определения кинематической вязкости (типа) моторного масла нами предлагается использо-

вать два электрофизических параметра — удельное сопротивление и диэлектрическую проницаемость, и один оптический — коэффициент преломления. Предположение о существовании корреляционной зависимости между кинематической вязкостью ММ и его удельным сопротивлением следует из общих физических соображений: чем больше вязкость жидкости, тем больше затруднено движение находящихся в ней носителей заряда. Наличие же корреляции между вязкостью и диэлектрической проницаемостью, а также коэффициентом преломления ММ обусловлено различиями химического состава рассматриваемых типов ММ — высокомолекулярные насыщенные циклические и ароматические углеводороды в составе минеральных ММ [1], полиолефины и полиэфирфосфорной и кремневой кислот в составе синтетических ММ [2] и их смесь как основа полусинтетического ММ.

Целью данной работы являлась практическая реализация высокоинформативного комплексного метода определения типа ММ, основанного на измерении указанных характеристик, с изготовлением и апробацией соответствующих портативных измерительных устройств.

Особенности измерения электрофизических характеристик моторных масел

По своим электрическим свойствам моторные масла относятся к классу жидких диэлектриков. В соответствии с рекомендациями международной электротехнической комиссии (ИЕС) измерения электрофизических характеристик элек-

троизоляционных жидкостей (в том числе моторных масел) производится по методикам, описанным в [1, 2].

В [3] предлагается определение диэлектрической проницаемости ϵ и удельного сопротивления ρ по результатам измерений электрической емкости C и сопротивления R конденсаторной электрохимической ячейки, заполненной исследуемой жидкостью. Недостатком этого способа является использование постоянного внешнего напряжения, прикладываемого к электродам ячейки, поскольку в данном случае приэлектродные эффекты на границе раздела «электрод — жидкость» достаточно сильно искажают результаты измерений удельного сопротивления исследуемого раствора (погрешность измерений может достигать 100%).

В [4] емкостной ток и ток проводимости измеряются при приложении к исследуемому образцу переменного напряжения трапецеидальной формы, что существенно снижает влияние приэлектродных эффектов. Емкостной ток определяют во время роста/спада напряжения, а ток проводимости — в период стабильности напряжения. Подобное временное разделение составляющих полного тока упрощает процедуру измерения емкости и сопротивления электрохимической ячейки и соответствующих им значений диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления. Недостатком данного способа, как и предыдущего, является принципиальная невозможность полного исключения влияния приэлектродных процессов на результаты измерений, поскольку величина R определяется на интервалах с постоянным значением внешнего напряжения, т. е. в квазистационарном режиме. При этом погрешность измерения величины R , по нашим данным, может составлять до 10–15%.

Для определения диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления мы предлагаем использовать синусоидальный переменный ток, что в полной мере исключает влияние приэлектродных эффектов на процесс переноса заряда через ячейку благодаря отсутствию временных участков с постоянным значением напряжения на ней. В этом случае протекающий электрический ток имеет активную и реактивную составляющие, поэтому для определения величин R и C необходимо измерить полное сопротивление (импеданс) используемой конденсаторной электрохимической ячейки.

В предположении двухэлементной эквивалентной схемы такой ячейки, заполненной образцом ММ [5], для активной (Re) и реактив-

ной (Im) составляющих импеданса можно записать следующие выражения:

$$Re = \frac{R}{4\pi^2 C^2 R^2 \nu^2 + 1}; \quad (1)$$

$$Im = \frac{2\pi C R^2 \nu}{4\pi^2 C^2 R^2 \nu^2 + 1}, \quad (2)$$

где ν — частота переменного тока.

Измерив Re и Im , из системы уравнений (1) и (2) можно определить искомые значения R и C , а зная площадь электродов S и расстояние d между ними, найти электрофизические параметры диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления исследуемой пробы:

$$\epsilon = \frac{d}{S} \frac{C}{\epsilon_0}; \quad \rho = \frac{S}{d} \quad (3)$$

$$\rho = R \frac{S}{d}, \quad (4)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Измерительная схема, реализующая предложенный способ определения электрофизических характеристик ММ

Измерение импеданса ММ проводилось по схеме, показанной на рис. 1. Генератор Γ подает на делитель напряжения (состоящий из конденсаторной ячейки Z , заполненной исследуемым ММ, и сопротивления нагрузки R_H) входное синусоидальное напряжение фиксированной частоты.

Входное и выходное напряжения делителя синхронно оцифровываются двухканальным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и поступают на вход устройства математической обработки (УМО) входного и выходного сигналов, где определяются их амплитуды A , B и фазовый сдвиг $\Delta\phi$. Входное и выходное напряжения связаны соотношением

$$U_{in} = \frac{U_{out}}{Z + R_H} Z,$$

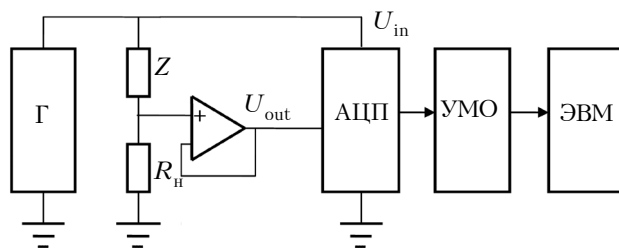


Рис. 1. Блок-схема портативного измерителя импеданса

где U_{in} , U_{out} — комплексные значения входного и выходного напряжения делителя,
 $U_{in}=A \cdot \exp(j\omega t)$,
 $U_{out}=B \cdot \exp(j(\omega t + \Delta\varphi))$.

Z — полное сопротивление (импеданс) ячейки.

Отсюда получаем выражение

$$Z = \frac{R_n}{\frac{A}{B} \exp(j\Delta\varphi) - 1}, \quad (4)$$

куда входят значения A , B , определенные устройством математической обработки, и сдвиг фаз $\Delta\varphi$ на фиксированной частоте измерений.

Отметим, что для предотвращения шунтирующего влияния входных каскадов АЦП на результаты измерений импеданса высокоомной конденсаторной ячейки оцифровка выходного напряжения делителя проводится после повторителя напряжения на основе прецизионного операционного усилителя со сверхнизким входным током (ОРА129). Также для уменьшения влияния на результаты измерений «эфирных» помех выполнено экранирование всей измерительной схемы. Для определения удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости образцов ММ был использован портативный измеритель импеданса [6], изготовленный в ИФП им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины в соответствии с приведенной выше блок-схемой.

На рис. 2 представлены типовые экспериментальные частотные зависимости составляющих импеданса цилиндрической конденсаторной ячейки, заполненной образцом ММ, и аппроксимирующие их кривые, соответствующие модельным выражениям (1) и (2) для двухэлементной эквивалентной схемы ячейки. Расчетные значения параметров: удельное сопротивление 26,53 ГОм·см, диэлектрическая постоянная 2,38.

Как видно из рис. 2, оптимальным для измерений импеданса является частотный интервал 10—100 Гц, и при определении электрофизических характеристик ММ достаточно проводить измерения на одной фиксированной частоте из этого диапазона. В свою очередь, практически полное совпадение экспериментальных и модельных кривых (величина среднеквадратического отклонения в оптимальном частотном диапазоне не превышает 0,7%) свидетельствует об отсутствии влияния приэлектродных эффектов на процесс прохождения электрического тока через конденсаторную ячейку. В противном случае в эквивалентной схеме ячейки кроме параметров R и C присутствовали бы и другие компоненты (емкость двойного зарядового слоя, сопротивление переносу заряда, диффу-

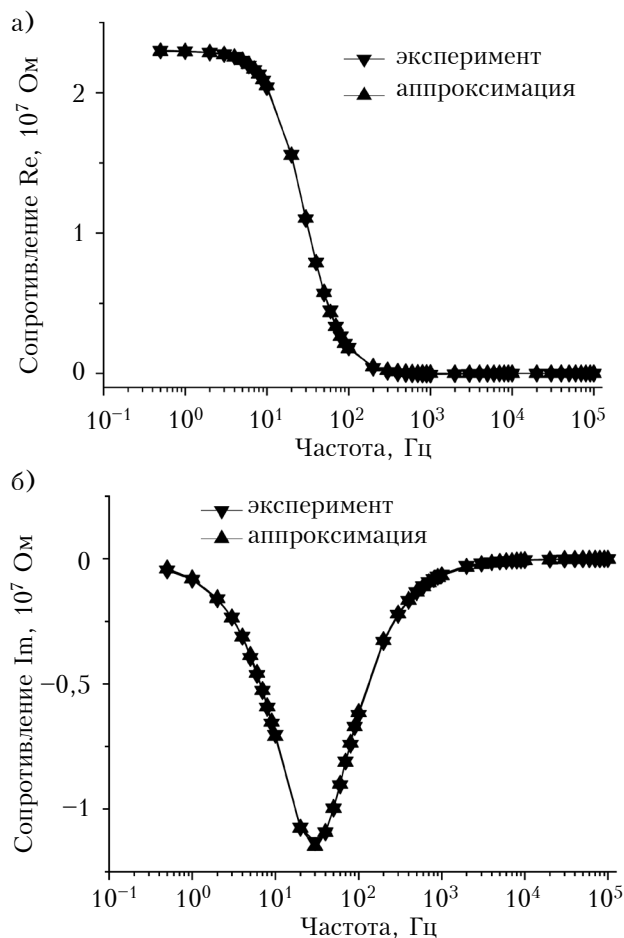


Рис. 2. Типовые экспериментальные частотные зависимости активной (а) и реактивной (б) составляющих импеданса цилиндрической конденсаторной ячейки, заполненной образцом ММ Akvilon CLASSIC 15W-40

зионный импеданс), а аппроксимация экспериментальных данных выражениями (1), (2) не была бы столь точной.

Определение характеристик ММ оптическим методом

Основными и наиболее распространенными оптическими методами диагностики качества моторного масла является фотометрия [7], флуоресцентный анализ [8], инфракрасная Фурье-спектроскопия [9, 10] и атомно-абсорбционная спектрометрия [11]. Однако ни один из них не может быть использован для проведения экспрессного анализа ММ, поскольку либо не обладает достаточной точностью измерений (фотометрия), либо требует сложного и дорогостоящего оборудования. Альтернативным методом диагностики ММ является метод, основанный на эффекте поверхностного плазмонного резонанса (ППР) [12]. Приборы, использующие в своей работе явление ППР, чувствительны к малым концентрациям исследуемых веществ (0,01—2 нг/мл) [13, 14] и характеризуются высокой точностью измерений [15].

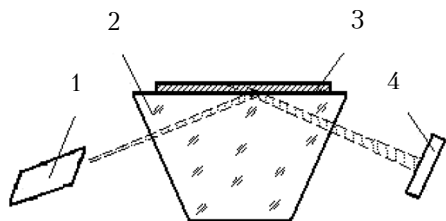


Рис. 3. Оптическая схема в геометрии Кречмана [16]:
1 — лазер; 2 — призма; 3 — металлическая пленка;
4 — фотоприемник

Для наблюдения явления ППР используют оптическую схему Кречмана: поверхностные плазмоны возбуждаются в тонкой металлической пленке, нанесенной на рабочую грань призмы полного внутреннего отражения и контактирующей с исследуемым веществом, монохроматическим p -поляризованным светом лазера определенной длины волны (рис. 3). Феномен ППР проявляется в том, что при углах падения луча θ , больших критического, в металлической пленке под действием лазерного излучения возбуждаются плазмон-поляритонные колебания электронов проводимости, при этом резко уменьшается интенсивность отраженного света (коэффициента отражения), измеренная фотоприемником при определенном резонансном угле падения θ (рис. 4). Величина резонансного угла зависит от высокочастотной диэлектрической проницаемости ϵ вещества на поверхности металлической пленки (а также показателя его преломления n , поскольку $\epsilon = n^2$). Увеличение показателя преломления приводит к соответствующему сдвигу резонансного угла на величину $\Delta\theta$ в сторону больших углов падения (см. рис. 4), а его уменьшение — в сторону меньших углов.

В процессе хранения и эксплуатации моторного масла вследствие окисления при контакте с агрессивными и высокотемпературными средами растет его оптическая плотность и показатель преломления [17]. В [18] впервые была

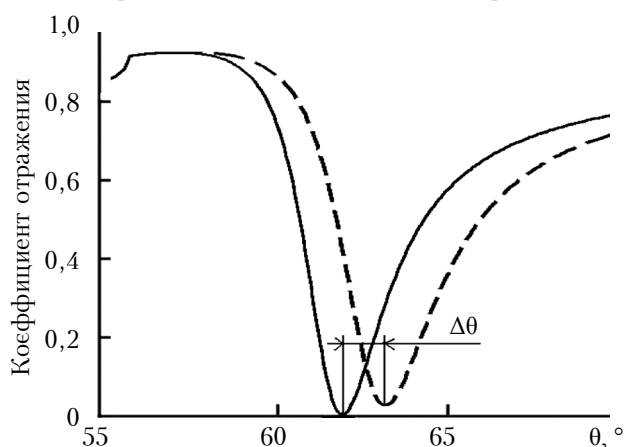


Рис. 4. Рефрактометрическая характеристика ППР до (сплошная линия) и после (штриховая линия) изменения показателя преломления (диэлектрической проницаемости) исследуемого вещества

показана возможность диагностики моторного масла с помощью метода ППР. Это позволило определить не только уровень деградации масла, но и наличие частиц, образовавшихся в результате износа, а также их объемную концентрацию. Можно предположить, что поскольку ММ разных типов имеют разный состав, значения их высокочастотной диэлектрической проницаемости также будут различаться, что позволит по ее величине провести их идентификацию.

Рефрактометрические характеристики и значения резонансного угла для образцов моторных масел измеряли с помощью портативного ППР-рефрактометра «Плазмон-71» [19], разработанного в ИФП. Перед определением $\theta_{\min}$ выполняли аппроксимацию характеристики отражения $R(\theta)$ полиномом 2-й степени в окрестности измеренного минимума [20], что позволяло повысить разрешающую угловую способность определения минимума с $75''$ до $6''$. Абсолютная погрешность измерения резонансного угла составляла $\pm 24''$, что соответствует абсолютной погрешности показателя преломления $\pm 0,00008$. Измеренные рефрактометрические характеристики ППР двух типов ММ (в виде зависимости напряжения на выходе фотоприемника U от угла θ падения света на границе «стекло — металл») приведены на рис. 5.

Для построения рефрактометрической характеристики ППР и определения резонансного угла исследуемые образцы ММ по очереди прокачивались шприцевым автоматизированным насосом через измерительную ячейку ППР-рефрактометра, которая обеспечивала их контакт с поверхностью металлической пленки чувствительного элемента. Рефрактометр, насос и резервуары с образцами ММ размещались в термостате при температуре 20°C для уменьшения температурной погрешности результатов измерений [21].

Значение показателя преломления для образца ММ было рассчитано путем численно-

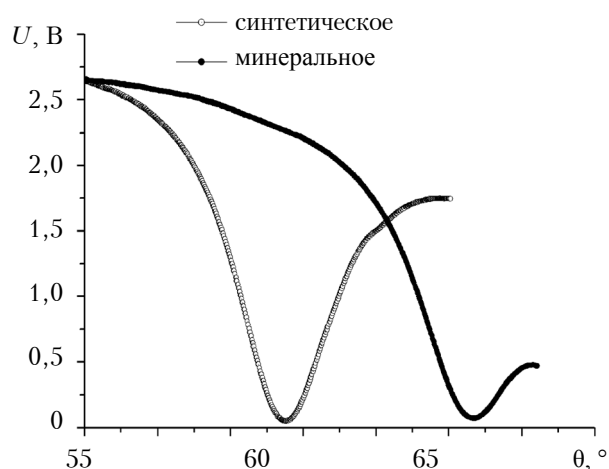


Рис. 5. Рефрактометрические характеристики ППР двух типов моторных масел: синтетического Castrol Magnatec и минерального Akvilon Classic

го моделирования соответствующих рефрактометрических характеристик с использованием измеренного значения $\theta_{\min}$, показателя преломления стеклянной призмы $n = 1,59994$, длины волны $\lambda = 850$ нм и определенных подгонкой оптических констант золотой пленки толщиной $d = 48 \pm 3$ нм чувствительного элемента ППР-сенсора (программа WinSpall 3.0). Численное моделирование выполняли, применяя формулы Френеля и математический формализм матриц рассеяния Джонса [22]. Значения показателя преломления исследуемых проб ММ лежали в диапазоне от 1,46 до 1,48.

Обсуждение полученных результатов

С использованием описанной методики получения электрических и оптических характеристик ММ и указанных измерительных устройств

был получен массив значений диэлектрической постоянной, удельного сопротивления и коэффициента преломления для 28 образцов ММ разных типов (см. **таблицу** и **рис. 6**).

Из анализа данных на рис. 6 видно, что идентификация типа ММ возможна путем измерения удельного сопротивления или коэффициента преломления. Причем по рефрактометрическому измерению уверенно идентифицируются все 14 исследованных образцов синтетических ММ (см. рис. 6, *в*). Также можно говорить о тенденции увеличения удельного сопротивления при переходе от синтетических ММ к маслам на минеральной основе (рис. 6, *а*). В то же время, не просматривается заметной корреляции типа ММ с величиной диэлектрической проницаемости (рис. 6, *б*). Анализируя рис. 6, *в*, мож-

Электрические и оптические параметры образцов ММ разных типов

№ пробы (условное обозначение)	Тип моторного масла / торговая марка	Диэлектрическая проницаемость	Удельное сопротивление, ГОм см	Коэффициент преломления
Минеральные масла				
1 (м1)	Bars, 15W-40	2,36	11,6	1,48501
2 (м2)	Минеральное 15W-40	2,33	21,1	1,48653
3 (м3)	Люкс 15W-40	2,36	40,8	1,48850
4 (м4)	Akvilon Classic 15W-40	2,38	26,53	1,48854
5 (м5)	Yuko 15W-40	2,31	8,06	1,48651
6 (м6)	Grom-Ex 15W-40	2,34	8,02	1,48350
Полусинтетические масла				
7 (п-с1)	Ярнефть, 10W-40	2,31	32,1	1,48250
8 (п-с2)	Shell Helix HX7 10W-40	2,27	15,17	1,46900
9 (п-с3)	ЛЕОЛ long life SL-CF Лидер 10W-40	2,32	12,68	1,47953
10 (п-с4)	Akvilon extra 10W-40	2,30	41,80	1,48451
11 (п-с5)	Liqui Molly 10W-40	2,29	8,85	1,47202
12 (п-с6)	Mobil Ultra 10W-40	2,37	6,79	1,47804
13 (п-с7)	ZIC X5 10W-40	2,25	15,8	1,47100
14 (п-с8)	XADO 10W-30	2,32	5,57	1,47201
Синтетические масла				
15 (с1)	Mobil Super 3000 5W-30	2,32	3,84	1,46603
16 (с2)	Toyota genuine 5W-30	2,27	6,70	1,46651
17 (с3)		2,28	6,35	1,46658
18 (с4)		2,41	3,52	1,46653
19 (с5)	HUNDAI super extra 5W-30	2,37	7,10	1,46600
20 (с6)	ELF 900 NF 5W-40	2,34	4,75	1,46708
21 (с7)	Mobil Super 3000 X1 5W-40	2,28	8,15	1,46523
22 (с8)	ELF 900 SXR evolution 5W-40	2,45	2,12	1,46550
23 (с9)	Motul 8100 X-cess 5W-40	2,31	5,99	1,46450
24 (с10)	Castrol Magnatec A3/B4 5W-40	2,35	3,34	1,46507
25 (с11)	Aral Hight Tronic 5W-40	2,47	1,92	1,46553
26 (с12)	Castrol Edge 5W-40	2,36	7,83	1,46521
27 (с13)	Mobil Super (new) 3000 5W-40	2,38	3,35	1,46526
28 (с14)	Motul 8100 x-cess NEW 5W-40	2,39	5,42	1,46655

но заметить, что изменение коэффициента преломления при переходе от синтетических масел к минеральным происходит достаточно плавно через область полусинтетических масел. В связи с этим могут возникать затруднения в идентификации образцов, у которых значения коэффициента преломления лежат в переходной области. Этот недостаток отчасти можно устрани-

нить путем использования одновременно двух характеристик — оптической и электрической.

Как видно из **рис. 7**, область расположения точек, соответствующих синтетическим маслам, четко ограничена и удалена от всех других образцов, что позволяет уверенно и однозначно идентифицировать этот тип масел. При этом области точек для образцов масел с минеральной составляющей — полусинтетических и минеральных — примыкают друг к другу по оси абсцисс, различаясь главным образом величиной коэффициента преломления.

Отметим, что представленный на **рис. 7** способ идентификации типа ММ не является оптимальным с точки зрения «экспрессности» анализа, поскольку требует проведения одновременно оптических и электрических измерений, однако этот недостаток компенсируется высокой распознавательной способностью. Заметим также, что, учитывая известное электродинамическое соотношение $n \approx \sqrt{\epsilon}$ между коэффициентом преломления n и квазистатической диэлектрической проницаемостью среды ϵ , можно было бы ожидать корреляционной зависимости между типом ММ и его диэлектрической проницаемостью, подобно изображенной на **рис. 6, в**, однако этого обнаружено не было (см. **рис. 6, б**). Причиной отсутствия указанной корреляции могло быть наличие различной дисперсии относительной диэлектрической проницаемости образцов ММ, поскольку определение выполнялось в существенно различающихся спектральных диапазонах — герцевом (методом импедансметрии) и терагерцевом (методом ППР). Кроме того, погрешность измерения диэлектрической проницаемости образцов ММ составляла до 3%, в отличие от очень малой погрешности определения коэффициента преломления, характерной для оптических измерений (0,006% в нашем случае). Можно предположить, что в случае уменьшения погрешности измерения электрофизических характеристик ММ при использовании более точных мостовых схем измерения импеданса корреляция между

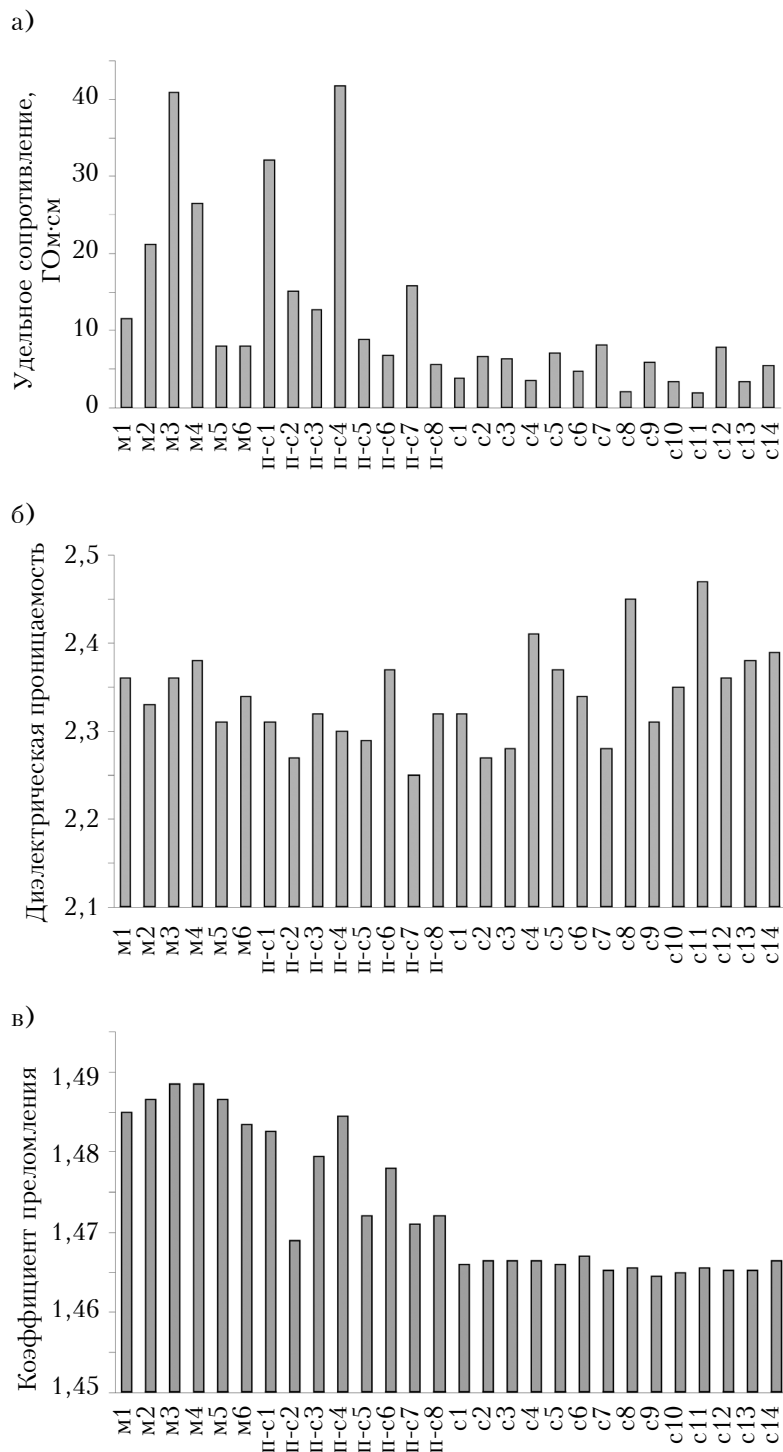


Рис. 6. Диаграммы значений удельного сопротивления (а), диэлектрической проницаемости (б) и коэффициента преломления (в) образцов моторных масел различных типов

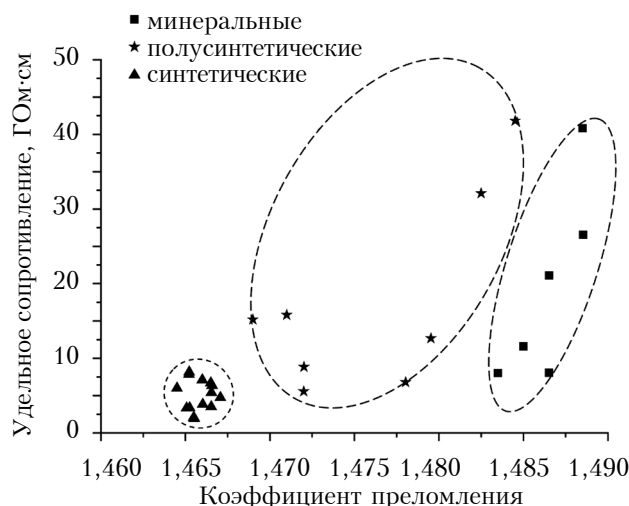


Рис. 7. Распределение исследуемых образцов моторных масел в декартовых координатах коэффициента преломления и удельного сопротивления

типом ММ и его диэлектрической проницаемостью может быть выявлена [23].

Выводы

Таким образом, показана возможность идентификации типа моторного масла (минеральное, полусинтетическое, синтетическое) путем комплексных измерений его рефрактометрической и электрофизической характеристик (коэффициента преломления и удельного сопротивления) благодаря наличию определенных корреляционных зависимостей между типом ММ и обоими указанными физическими параметрами. При этом наиболее точно этим методом можно выявить чисто синтетические моторные масла и масла с минеральной составляющей (полусинтетические и минеральные). Результаты исследования могут быть использованы как для идентификации типа моторного масла, так и для выявления фальсификата.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. IEC 60247:2004. Insulating liquids - Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) and d.c. resistivity.
2. IEC 61620:1998. Insulating liquids - Determination of the dielectric dissipation factor by measurement of the conductance and capacitance.
3. Черножуков Н.И., Крейн С.Э., Лосиков Б.В. Химия минеральных масел. — ГосТопТехИздат, 1951.
4. Мамедъяров М.А. Химия синтетических масел. — Ленинград: Химия, 1989.
5. Кукла А.Л., Мамыкин А.В., Майстренко А.С. и др. Использование метода импедансной спектроскопии для анализа бензольного топлива // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2015. — № 2–3. — С. 61–67. — <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2015.2-3.61>
6. Кукла А.Л., Мамыкин А.В., Майстренко А.С., Павлюченко А.С. Экспресс анализатор параметров функциональных материалов на основе метода импедансной спектроскопии // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2012. — Т. 3(9). — № 3. — С. 6–15. — <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2012.3.114507>

7. Чакчир Б.А., Алексеева Г.М. Фотометрические методы анализа: Методические указания. — С.-Пб.: Изд-во СПХФА, 2002.
8. Забурнягин В.П., Яровой П.Н. Применение лазерного флуоресцентного анализа для идентификации нефтепродуктов // Журнал прикладной спектроскопии. — 1988. — Т. 48, № 5. — С. 819–822.
9. Powell J.R., Toms A.M. Molecular Analysis of Lubricants by FTIR Spectroscopy // P/PM Technology. — 1997. — vol. 10, N 4. — P. 58–64.
10. Bley T., Pignatelli E., Schütze A. Multi-channel IR sensor system for determination of oil degradation // Journal of Sensors and Sensor Systems. — 2014. — Vol. 3. — P. 121–132. — <https://doi.org/10.5194/jsss-3-121-2014>
11. Мышкин Н.К., Холодилов О.В., Маркова Л.В., Семенюк М.С. Диагностика изнашивания смазанных подвижных сопряжений // Трение и износ. — 1986. — Т. 7, № 6. — С. 1091–1101.
12. Milanese M., Ricciardi A., Manerab M.G. et al. Real time oil control by surface plasmon resonance transduction methodology // Sensors and Actuators A. — 2015. — Vol. 223. — P. 97–104. — <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.12.008>
13. Shalabney A., Abdulhalim I. Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors // Laser Photonics Rev. — 2011. — Vol. 5, N 4. — P. 571–606. — <https://doi.org/10.1002/lpor.201000009>
14. Войтович И.Д., Корсунский В. М. Сенсоры на основе плазмонного резонанса: принципы, технологии, применения. — Киев: Сталь, 2011.
15. Maslov V.P., Dorozinsky G.V., Dorozinska H.V. Promising method for determining the concentration of nano-sized diamond powders in water suspensions // Functional Materials Journal (FMJ). — 2018. — Vol. 25, iss. 1. — P. 158–164. — <https://doi.org/10.15407/fm25.01.158>
16. Kretschmann E., Raether H. Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light // Naturforschung. — 1968. — Vol. 123. — P. 2135–2136. — <https://doi.org/10.1515/zna-1968-1247>
17. Liptuga A.I., Dorozinsky G. V., Gordienko V.I. et al. Diagnostics of motor oil quality by using the device based on surface plasmon resonance phenomenon // Scholars Journal of Engineering and Technology. — 2015. — Vol. 3. — P. 372–374.
18. Maslov V.P., Dorozinsky G.V., Khrystosenko R.V. et al. Surface plasmon resonance – a promising method for estimating the quality of motor oil // Trans & Motauto World Journal. — 2017. — Vol. 1. — P. 41–44.
19. Dorozinska H., Dorozinsky G., Maslov V., Kachur N. The use surface plasmon resonance to determine the optical parameters of UV-adhesive and control polymerization process // American Journal of Materials Science and Application. — 2019. — Vol. 7, N 1. — P. 25–29. — <https://doi.org/10.15406/msej.2019.03.00090>
20. Ширшов Ю. М., Самойлов А. В., Христиненко Р. В. и др. Анализ и численное моделирование ППР-спектрометров с механической разворткой по углу: алгоритм определения угловой позиции минимума // Реєстрація, зберігання і обробка даних. — 2004. — Т. 6, № 3. — С. 3–18.
21. Dorozinska H.V., Turu T.A., Markina O.M. et al. Influence of temperature on the measuring accuracy of devices based on surface plasmon resonance phenomenon // Modern Instrumentation. — 2018. — Vol. 7. — P. 1–10. <https://doi.org/10.4236/mi.2018.71001>
22. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. — Москва: Мир, 1981.
23. Григоров А.Б., Наглюк И.С. Диэлектрические свойства моторных масел // Автомобильный транспорт. — Харьков: Харьк. нац. автом.-дорож. ун-т., 2009. — № 25. — С. 167–170.

Дата поступления рукописи
в редакцию 09.04 2019 г.

DOI: 10.15222/TKEA2019.3-4.36
УДК 532.538; 539.21; 621.38

А. В. МАМИКІН, О. Л. КУКЛА, Л. М. МАТВИЄНКО,
Г. В. ДОРОЖИНСЬКА, В. П. МАСЛОВ,
Г. В. ДОРОЖИНСЬКИЙ

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

ВИСОКОІНФОРМАТИВНИЙ КОМПЛЕКСНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТИПУ МОТОРНОГО МАСТИЛА

Експериментально показано наявність кореляційних залежностей між типом моторного мастила та його рефрактометричними і електрофізичними характеристиками (коефіцієнтом заломлення, питомим опором і діелектричною проникністю). Запропоновано способи визначення типу моторного мастила, засновані на вимірюванні зазначених характеристик, а також прототипи портативних вимірювальних пристроїв, що реалізують ці способи. Для визначення питомого опору та діелектричної проникності використано метод імпедансної спектроскопії, а для визначення коефіцієнта заломлення застосовано пристрій на основі ефекту поверхневого плазмонного резонансу. Показано, що точність ідентифікації типу моторного мастила значно збільшується, якщо одночасно враховувати вказані фізичні характеристики. Показано, що зазначеним комплексним методом найбільш точно можна виявити, з одного боку, чисто синтетичні моторні мастила, а з іншого — мастила з мінеральною складовою (напівсинтетичні та мінеральні). Результати досліджень можуть бути використані як для ідентифікації типу моторного мастила, так і для виявлення фальсифікату.

Ключові слова: імпедансна спектроскопія, поверхневий плазмонний резонанс, моторне мастило, питомий опір, діелектрична проникність, коефіцієнт заломлення.

DOI: 10.15222/TKEA2019.3-4.36
UDC 532.538; 539.21; 621.38

A. V. MAMYKIN, A. L. KUKLA, L. M. MATVIENKO,
H. V. DOROZINSKA, V. P. MASLOV, G. V. DOROZINSKY

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

HIGHLY INFORMATIVE INTEGRATED METHOD FOR DETERMINING THE TYPE OF ENGINE OIL

The presence of correlation dependences between the type of motor oil and its refractometric and electrophysical characteristics (refractive index, specific resistance and dielectric constant) is experimentally shown. Methods for determining the type of engine oil are proposed, based on the measurement of these characteristics, as well as prototypes of portable measuring devices that implement these methods. Impedance spectroscopy was used to determine the resistivity and dielectric constant, and a device based on the effect of surface plasmon resonance was used to determine the refractive index. It is shown that the accuracy of identification of the type of motor oil increases significantly with simultaneous consideration of all above physical characteristics. It is shown that this complex method can most accurately detect, on the one hand, purely synthetic motor oils, on the other hand, oils with a mineral component (semi-synthetic and mineral). The results of the studies can be used to identify the type of motor oil as well as to detect forgery.

Keywords: impedance spectroscopy, surface plasmon resonance, engine oil, resistivity, dielectric constant, refractive index.

REFERENCES

1. IEC 60247:2004. Insulating liquids - Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan d) and d.c. resistivity.
2. IEC 61620:1998. Insulating liquids - Determination of the dielectric dissipation factor by measurement of the conductance and capacitance.
3. Chernozhukov N.I., Kreyn S.E., Losykov B.V. *Khimiya mineral'nykh masel* [Chemistry of mineral oils]. GosTopTekhizdat, 1951, 307 p. (Rus)
4. Mamed'yarov M.A. *Khimiya sinteticheskikh masel* [Chemistry of synthetic oils]. Leningrad, Chemistry, 1989, 240 p. (Rus)

5. Kukla O.L., Mamykin A.V., Maistrenko A.S. et al. [Application of impedance spectroscopy method for analysis of benzanol fuels]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniya v Elektronnoi Apparature*, 2015, no. 2–3, pp. 61–67. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.61> (Rus)
6. Kukla O.L., Mamykin A.V., Maistrenko A.S., Pavluchenko A.S. [Express analyzer of functional materials parameters based on the impedance spectroscopy method]. *Sensor electronics and microsystem technologies*, 2012, vol. 3(9), iss. 3, pp. 6–15. <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2012.3.114507> (Rus)
7. Chakchir B.A., Alekseyeva G.M. *Fotometricheskiye metody analiza: Metodicheskkiye ukazaniya* [Photometric

methods of analysis: Guidelines]. Saint Petersburg, SPChFA, 2002. (Rus)

8. Zaburnagin V.P., Jarovoj P.N. [Application of laser fluorescence analysis for the identification of petroleum products]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 1988, vol. 48, iss. 5, pp. 819–822. (Rus)

9. Powell J.R., Toms A.M. Molecular Analysis of Lubricants by FTIR Spectroscopy. *P/PM Technology*, 1997, vol. 10, no. 4, pp. 58–64.

10. Bley T., Pignatelli E., Schütze A. Multi-channel IR sensor system for determination of oil degradation. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2014, vol. 3, pp. 121–132. <https://doi.org/10.5194/jsss-3-121-2014>

11. Myshkin N.K., Holodilov O.V., Markova L.V., Semenuk M.S. [Diagnosis of wear of lubricated mobile couplings]. *Friction and wear*, 1986, vol. 7, iss. 6, pp. 1091–1101. (Rus)

12. Milanese M., Ricciardi A., Manerab M.G. et al. Real time oil control by surface plasmon resonance transduction methodology. *Sensors and Actuators A*, 2015, vol. 223, pp. 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.12.008>

13. Shalabney A., Abdulhalim I. Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors. *Laser Photonics Rev.*, 2011, vol. 5, no 4, no. 571–606.

14. Voytovich I.D., Korsunskiy V. M. *Sensory na osnove plazmonnogo rezonansa: printsipy, tekhnologii, primeneniya* [Plasmon resonance sensors: principles, technologies, applications]. Kyiv, Stal, 2011, 534 p. (Rus)

15. Maslov V.P., Dorozinsky G.V., Dorozinska H.V. Promising method for determining the concentration of nano-sized diamond powders in water suspensions. *Functional Materials Journal (FMJ)*, 2018, vol. 25, iss. 1, pp. 158–164. <https://doi.org/10.15407/fm25.01.158>

16. Kretschmann E., Raether H. Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light. *Naturforschung*,

1968, vol. 123, pp. 2135–2136. <https://doi.org/10.1515/zn-1968-1247>

17. Liptuga A.I., Dorozinsky G. V., Gordienko V.I. et al. Diagnostics of motor oil quality by using the device based on surface plasmon resonance phenomenon. *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 2015, vol. 3, pp. 372–374.

18. Maslov V.P., Dorozinsky G.V., Khrystosenko R.V. et al. Surface plasmon resonance – a promising method for estimating the quality of motor oil. *Trans & Motauto World Journal*, 2017, vol. 1, pp. 41–44.

19. Dorozinska H., Dorozinsky G., Maslov V., Kachur N. The use surface plasmon resonance to determine the optical parameters of UV-adhesive and control polymerization process. *American Journal of Materials Science and Application*, 2019, vol. 7, N 1, pp. 25–29. <https://doi.org/10.15406/msej.2019.03.00090>

20. Shirshov Yu.M., Samoylov A.V., Christosenko R.V. et al. [Analysis and numerical simulation of mechanical angle-scanning SPR spectrometers: an algorithm for determining the minimum angular position]. *Registration, storage and processing of data*, 2004, vol. 6, iss. 3, pp. 3–18. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/50686> (Rus)

21. Dorozinska H.V., Turu T.A., Markina O.M. et al. Influence of temperature on the measuring accuracy of devices based on surface plasmon resonance phenomenon. *Modern Instrumentation*, 2018, vol. 7, pp. 1–10. <https://doi.org/10.4236/mi.2018.71001>

22. Azzam R., Bashara N. *Ellipsometriya i polarizovanny svet* [Ellipsometry and polarized light]. Moscow, Mir, 1981, 583 p. (Rus)

23. Grigorov A.B., Naglyuk I.S. [Dielectric properties of motor oils]. *Automobile Transport*, Kharkov, 2009, no. 25, pp. 167–170. (Rus)

Описание статьи для цитирования:

Мамыкин А. В., Кукла А. Л., Матвиенко Л. М., Дорожинская Г. В., Маслов В. П., Дорожинский Г. В. Высокоинформативный комплексный метод определения типа моторного масла. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2019, № 3-4, с. 36–44. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.36>

Cite the article as:

Mamykin A. V., Kukla A. L., Matvienko L. M., Dorozinska H. V., Maslov V. P., Dorozinsky G. V. Highly informative integrated method for determining the type of engine oil. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 3-4, pp. 36-44. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.36>

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

Борковська Людмила Володимирівна, канд. фіз.-мат. наук, зав. лабораторії, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ, м. Київ

Глушеченко Едуард Миколайович, канд. техн. наук, начальник відділку, НПП «Сатурн», м. Київ

Коваль Вікторія Михайлівна, канд. техн. наук, доцент, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Курак Владислав Володимирович, канд. техн. наук, доцент, Херсонський національний технічний університет

Плаксин Сергій Вікторович, докт. фіз.-мат. наук, зав. відділом, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, м. Дніпро

Сафронов Павло Сергієвич, канд. техн. наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет

Підписано до друку 26.09 2019 р. Формат 60×84 1/8. Друк. арк. 6,5. Тираж 100 прим. Зам. № 359

Оригінал-макет виготовлено в видавництві «Політехперіодика»

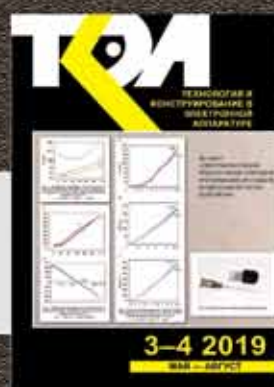
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3232 від 09.07.2008 р.

(65044, м. Одеса, а/с 17)

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

(65044, м. Одеса, пр-т. Шевченка, 1а)

*Номер готували
Вроцлав, Дніпро, Київ, Львів,
Одеса, Херсон, Чернівці.*



Пишіть
Передплачуйте
Читайте