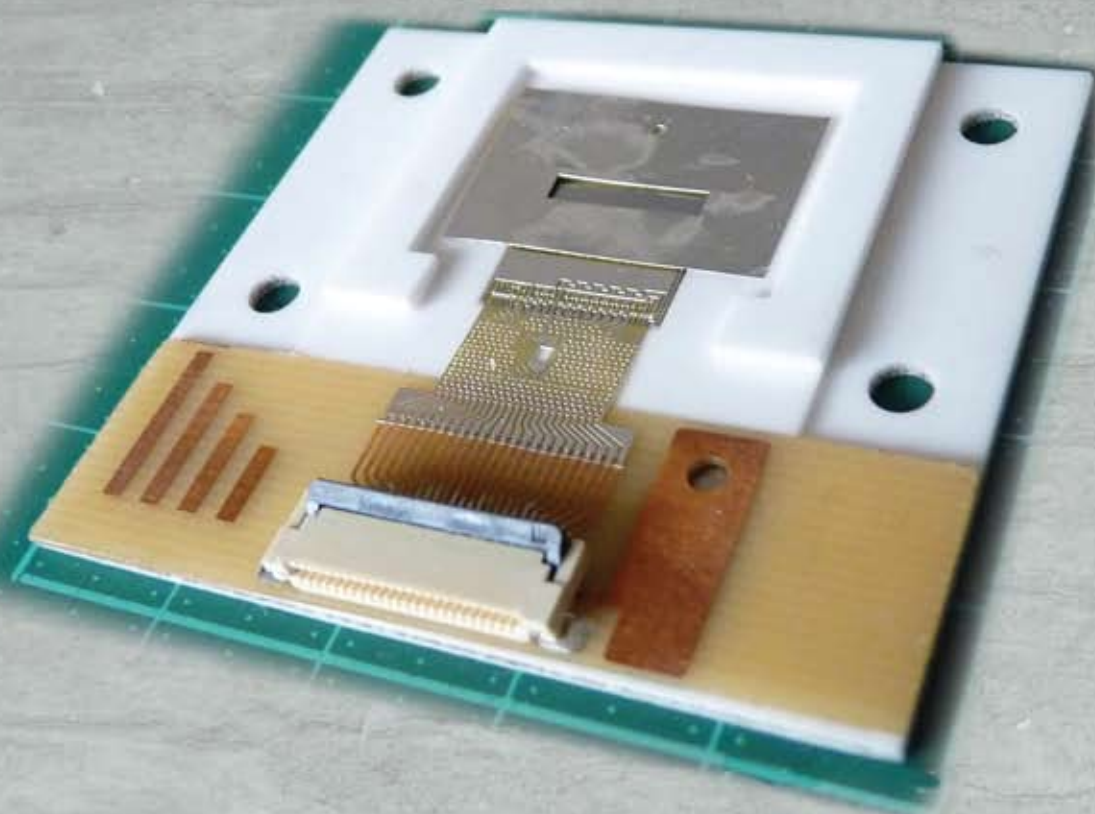


Технология и конструирование в электронной аппаратуре



К статье
«Координатно-чувствительный детектор
заряженных частиц для спектроскопии»



4–5 2016

ИЮЛЬ — ОКТЯБРЬ

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

ISSN 2225-5818

Регистрационный номер КВ 21788-11688ПР

Выходит один раз в 2 месяца

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

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев)

Включен в международную справочную систему по периодическим и продолжающимся изданиям

"Ulrich's Periodicals Directory" (США),

в международную систему библиографических ссылок CrossRef,

в наукометрическую базу РИНЦ научной электронной библиотеки России,

в базу данных DOAJ, в Google Scholar

Номер выпущен при поддержке

НПП «Сатурн», (г. Киев),

НПП «Карат» (г. Львов),

ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

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

В России Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.

В Белоруссии Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 23785.

В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.

Адрес редакции: Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17.

E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua,

тел. +38 (048)728-18-50, 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко,

А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2016 № 4–5

Год издания 40-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Чл.-корр. НАНУ,

д.ф.-м.н. А. Е. Беляев (г. Киев)

Д.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)

Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)

К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)

Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса)

Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. С. Г. Антошук (г. Одесса)

Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)

Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)

Д.т.н. А. П. Бондарев (г. Львов)

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

Д.ф.-м.н. В. В. Должиков (г. Харьков)

К.т.н. И. Н. Еримичой (г. Одесса)

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

Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)

Д.т.н. С. И. Круковский (г. Львов)

Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)

Чл.-корр. НАНУ,

д.ф.-м.н. В. С. Лысенко (г. Киев)

К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)

Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)

Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)

Д.ф.-м.н. С. В. Плаксин (г. Днепр)

К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)

К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)

Д.ф.-м.н. М. И. Самойлович (г. Москва)

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

Д.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)

Д. т. н. Я. Стеванович (г. Белград)

Д. т. н. З. Стевич (г. Белград)

Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)

К.т.н. В. Е. Трофимов (г. Одесса)

УЧРЕДИТЕЛИ

Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарёва

Научно-производственное

предприятие «Сатурн»

Одесский национальный

политехнический университет

Издательство «Политехпериодика»

Одобрено к печати

Ученым советом ОНПУ

(Протокол № 8 от 29.06 2016 г.)

Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

СОДЕРЖАНИЕ

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Омические контакты к материалам на основе нитрида индия. *П. О. Сай* (на английском языке) 3

Электронные средства: исследования, разработки

Экспериментальное исследование переходных процессов в программно-аппаратном устройстве цифровой фазовой автоподстройки частоты. *А. П. Бондарев, С. И. Алтуни* 15

Несущие конструкции с повышенными компоновочными характеристиками. *А. А. Ефименко, А. П. Карлангач* 23

Электрические и фотоэлектрические свойства гетероструктур $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$ и $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$. *Г. П. Пархоменко, П. Д. Марьяничук* 29

СВЧ-техника

Коммутационные управляемые устройства на $p-i-n$ -диодах миллиметрового диапазона длин волн. *Н. Ф. Карушкин, В. В. Малышко, В. В. Ореховский, А. А. Тухаринов* 34

Системы передачи и обработки сигналов

Обнаружение аномальных измерений при обработке данных малого объема. *В. С. Попукайло* 42

Сенсоэлектроника

Исследование частотной зависимости проводимости нитевидных кристаллов кремния при криогенных температурах для создания сенсоров температуры на их основе. *А. А. Дружинин, И. П. Островский, Ю. Н. Ховерко, Р. Н. Корецкий* 47

Функциональная микро- и наноэлектроника

Координатно-чувствительный детектор заряженных частиц для спектроскопии. *В. П. Сидоренко, Ю. В. Прокофьев, Д. С. Мурченко, В. М. Еременко, А. В. Шелехов* 53

Обеспечение тепловых режимов

Модель взаимосвязи геометрии ветвей термоэлементов и показателей надежности однокаскадных охладителей в режиме $Q_{0\text{max}}$. *В. П. Зайков, В. М. Мещеряков, Ю. И. Журавлёв* 61

Список рецензентов номера 68

Новые книги 66

ЗМІСТ

CONTENTS

Нові компоненти для електронної апаратури

Омічні контакти до матеріалів на основі нітриду індію. *О. П. Сай* (3)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Експериментальне дослідження перехідних процесів у програмно-апаратному пристрої цифрового фазового автопідстроювання частоти. *А. П. Бондарев, С. І. Алтунін* (15)

Несучі конструкції з підвищеними компоновальними характеристиками. *А. А. Єфіменко, О. П. Карлангач* (23)

Електричні і фотоелектричні властивості гетероструктур NiO/*p*-CdTe и NiO/*n*-CdTe. *Г. П. Пархоменко, П. Д. Мар'янчук* (29)

НВЧ-техніка

Комутаційні керовані пристрої на *p–i–n*-діодах міліметрового діапазону довжин хвиль. *М. Ф. Карушкін, В. В. Малишко, В. В. Ореховський, А. А. Тухарінов* (34)

Системи передачі та обробки сигналів

Виявлення аномальних вимірювань при обробці даних малого об'єму. *В. С. Попукайло* (42)

Сенсоелектроніка

Дослідження частотної залежності провідності ниткоподібних кристалів кремнію при криогенних температурах для створення сенсорів температури на їх основі. *А. А. Дружинін, І. П. Островський, Ю. Н. Ховерко, Р. Н. Корецький* (47)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Координатно-чутливий детектор заряджених частинок для спектроскопії. *В. П. Сидоренко, Ю. В. Прокоф'єв, Д. С. Мурченко, В. М. Єременко, А. В. Шелехов* (53)

Забезпечення теплових режимів

Підвищення показників надійності термоелектричного охолоджуючого пристрою шляхом вибору геометрії гілок термоелементів. *В. П. Зайков, В. І. Мещеряков, Ю. І. Журавльов* (61)

New components for electronic equipment

Ohmic contacts to InN-based materials. *P. O. Sai* (3)

Electronic devices: research, development

Experimental research of transient processes in firmware digital phase-locked loop. *A. P. Bondarev, S. I. Altunin* (15)

Mechanical structures with enhanced layout characteristics. *Yefimenko A. A., Karlangach A. P.* (23)

Electrical and photoelectric properties of heterostructures NiO/*p*-CdTe и NiO/*n*-CdTe. *H. P. Parkhomenko, P. D. Maryanchuk* (29)

Microwave engineering

Millimeter wave *p–i–n*-diode switching controlled devices. *N. F. Karushkin, V. V. Malyshko, V. V. Orekhovskiy, A. A. Tuharinov* (34)

Signals transfer and processing systems

Detection of outliers in processing of small size data. *V. S. Popukailo* (42)

Sensors

Features frequency conductivity of silicon sensor cryogenic temperatures. *A. A. Druzhinin, I. P. Ostrovsky, Yu. N. Khoverko, R. N. Koretsky* (47)

Functional micro- and nanoelectronics

Coordinate-sensitive charged particle detector for spectroscopy. *V. P. Sidorenko, Yu. V. Prokofiev, D. S. Murchenko, V. M. Yeremenko, A. V. Shelekhov* (53)

Thermal management

Model of correlation between geometry of thermoelectric branches and reliability indicators of single-stage coolers in Q_{0max} mode. *V. P. Zaikov, V. M. Meshcheryakov, Yu. I. Zhuravlev* (61)

P. O. SAI

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

E-mail: pavel_sai@mail.ua

OHMIC CONTACTS TO InN-BASED MATERIALS

The key aspects of ohmic contact formation to InN-based materials were investigated. Detailed analysis of studies conducted over the past three decades, allows determining the basic principles of such contacts. The contact structure properties and optimal conditions for them are presented. Different types of metallization are considered, the advantages and disadvantages of each are determined, including the basic requirements that such contact must meet. There is emphasis on the using multilayer metallization with the barrier layers. In the case of the InAlN/GaN systems, the general approaches of forming ohmic contacts were considered.

Keywords: ohmic contact, Indium Nitride, contact resistivity, rapid thermal annealing.

Nowadays, indium nitride (InN) as III-nitride compound (A^3N) attracts rapid interest among researchers from around the world. Mostly this is due to the breakthrough in InN growth. The most quality material is grown by metalorganic vapour phase epitaxy (**MOVPE**) and plasma-activated molecular beam epitaxy (**PAMBE**). Considering the fact that the synthesis of epitaxial InN films originated in the second half of the 70s, however only in 2002 the group of researchers headed by Davydov V. Yu et al. [1] found that this is a semiconductor with a narrow band gap of 0.7 eV in contrast to 1.9 eV, as previously thought. It follows that only $In_xGa_{1-x}N$ can span the entire visible wavelength range, and $In_xAl_{1-x}N$ overlap the wavelength range from infrared to ultraviolet (**Fig. 1**).

The attention focused on InN has increased significantly at the beginning of the XXI century.

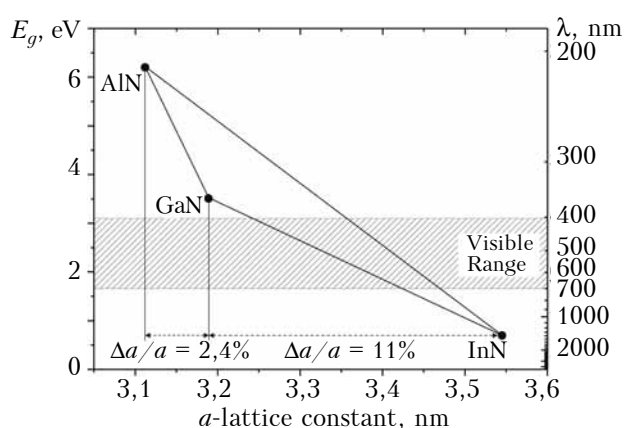


Fig. 1. A^3N band gap and a -parameter of crystal lattice

The various studies conducted in several papers [1–8] prevented the re-evaluation of the most important electrical InN parameters (**Table 1**). These data indicate the lowest effective mass for electrons among A^3N semiconductors [2], high saturation velocity [6] and high mobility [7]. All the superior electric properties of this material make InN a highly potential semiconductor for the fabrication of high-speed electronic devices. The terahertz (THz) emission with the maximum at the 3–5 THz is observed under electrical pumping from InN epilayers [9, 10], it makes this material promising for portable THz emitters.

Most A^3N films are grown on substrates such as sapphire (Al_2O_3), silicon (Si) or silicon carbide (SiC), because single crystals of III-nitride cannot be grown easily. The absence of homogeneous (crystallographically coordinated) substrates for (In,Ga,Al)N growth is one of the distinctive feature of A^3N growth. The epitaxial InN growth on GaN buffer layer is the best case, however significant mismatch of the lattice parameters a and thermal expansion coefficients α of the InN/GaN heterostructure must be considered. There are $\Delta a/a = +11\%$ and $\Delta\alpha/\alpha = -38\%$, respectively (**Fig. 1**). Such heteroepitaxial growth usually results in high level of structural defect density, due to the relaxation of local mechanical stresses on the InN/substrate interface.

X-ray diffraction (**XRD**), transmission electron microscopy (**TEM**), atomic force microscopy (**AFM**) are the most commonly encountered methods of investigating structural defects density in A^3N films. According to the recent structural studies [11–14] of epitaxial indium nitride films grown by MOVPE or PAMBE onto different

Table 1

Comparison of common semiconductor parameters [1–8, 15, 16]

Parameters at 300 K	InN (wurtzite)	AlN (wurtzite)	GaN		4H-SiC (wurtzite)	Si (diamond)
			(wurtzite)	(zinc bland)		
Band gap E_g , eV	0.70	6.20	3.51	3.30	3.25	1.12
Effective electron mass, m_e/m_0	0.04	0.40	0.20	0.13	0.42	0.19
Mobility of electrons μ , $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	2500	1100	1300	1000	800	1350
Saturation velocity v_s , $\cdot 10^7 \text{ cm/s}$	5.6	1.9	3.0	3.0	2.0	1.0
Crystal lattice parameters a, c , nm	$a = 0.355$ $c = 0.570$	$a = 0.275$ $c = 0.498$	$a = 0.319$ $c = 0.519$	$a = 0.452$	$a = 0.308$ $c = 1.510$	$a = 0.543$
Linear thermal expansion coefficient α , $\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$\alpha_a = 3.80$ $\alpha_c = 2.90$	$\alpha_a = 4.15$ $\alpha_c = 5.27$	$\alpha_a = 5.59$ $\alpha_c = 3,17$	—	$\alpha_a = 4.30$ $\alpha_c = 4.70$	$\alpha_a = 2.60$
Melting point, T , $^{\circ}\text{C}$	1100	3000	2500	2500	2830	1420
Dielectric constant, ϵ	15.3	9.1	8.9–9.5	9.7	9.7	11.8

substrates such as Si, SiC and Al_2O_3 , provide that threading dislocations are prevailing type among all known defects in InN layers. This type of defects can grow deeper and extend the semiconductor device active areas. Meanwhile, threading dislocations significantly affect both the characteristics of InN-based devices and the parameters of contacts to them. The density of dislocations usually is characterized by the wide range of high value from 10^9 cm^{-2} to 10^{11} cm^{-2} , depending on the growth parameters and film thickness.

The next important problem is creating ohmic contacts to the indium nitride films with high density of structural defects. Such contacts must satisfy a large set of requirements. There are technological requirements for their production process, requirements for reliability of such contacts and requirements to achieve an excellent electrical parameters of future contacts.

It should be pointed out that during the past years, a set of previous researches [17–52] uncovered important useful data about the ohmic contacts to In-based materials. Unfortunately, none of these researches could offer the complete picture. Therefore, in this study, our objective is to investigate them in more detail, and to explore, in the light of all these, principles of metal/InN ohmic contact formation. We plan to consider different types of metallization and to determine the advantages and disadvantages of each. At the end of present paper, the common approaches for ohmic contacts to InAlN/GaN heterostructures will be considered.

Conditions of ohmic contact formation

An ohmic contact is a metal/semiconductor contact exhibit linear current-voltage (I - V) characteristics in a range of operating currents. The contact resistivity (ρ_c), temperature dependence

of contact resistivity ($\rho_c(T)$), maximum working temperature are the main characteristics of ohmic contact.

Depending on the purpose of ohmic contacts, in other words on the complexity and type of load during operation, these contacts consist of a single layer (single-layer) or several layers (multilayer) of metallization, each of them has its own functionality:

1. Contact layer — metallization layer that is directly responsible for the formation of a potential metal-semiconductor barrier, because it formed in the immediate vicinity of semiconductor. Moreover, it should limit the diffusion of the upper metals onto the semiconductor surface;

2. Doping layer — thin layer between a semiconductor and a contact layer used for additional doping of the semiconductor near-surface layer, which is commonly used to implement the tunneling mechanism of current flow in ohmic contacts and reduce the contact resistivity;

3. Over layer — layer that is used for compensating of mechanical stresses caused by the significant mismatch of the lattice parameters and thermal expansion coefficients;

4. Barrier layer — refractory metallic layer, limiting inter-diffusion between contact and outer metallization layers;

5. Adhesion layer — metallic layer formed between the outer layers and contact layer, it is used to improve the wetting of the lower layer of material that is applied after the adhesion layer. As a result increases mechanical strength of general ohmic contact metallization;

6. Cap layer — metallic layer is designed to connect contact with external terminals to switch on the device in the electrical circuit. On the other hand, it acts as protective layer to minimize or prevent the oxidation of the underlying metals.

Ohmic contact can be formed in the following cases:

1. Absence of the metal–semiconductor potential barrier. In this case an electron work function of a metal (ϕ_m) must be less than an electron affinity of a n -type semiconductor (χ). In case of p -type semiconductor reversed condition ($\phi_m > \chi$) must be satisfied.

Implementation of the first case by selecting contact metal with a required work function for indium nitride is almost impossible due to the existence of high-density surface charges [17]. It can significantly exceed the concentration of majority carriers. As a result, the surface charges significantly affect the energy diagram of the metal–semiconductor heterojunction that is virtually independent of the work function of the contact metal [18]. Managing the concentration of surface states usually carried out using various technological treatments semiconductor films. There are the processes of preparing the semiconductor surface before the metal deposition, process of metal deposition, annealing process of formed contacts. Therefore given processes will significantly affect the ohmic contact resistivity – one of the most important parameters.

2. The presence of the narrow metal–semiconductor potential barrier that allows electrons to tunnel through the barrier. To form ohmic contact in this case the additional doping of contact layer is often used. As a result the space charge region is so thin that quantum-mechanical tunneling of charge carriers is possible. However, InN films are usually characterized by the high electron concentration in the range of $10^{17} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ due to the growth specifics [5]. This fact contributes to the formation of low-resistance ohmic contact to the semiconductor without additional doping of near-surface semiconductor layers. Moreover, the significant concentration of surface states facilitates a solution to the problem of formation of a narrow potential barrier.

3. The case of the sufficiently low metal–semiconductor potential barrier. It is necessary for possibility of carriers to flow over the barrier. The low-barrier contacts usually are formed due to the realization of surface pretreatment and subsequent correct selection of metallization layers for deposition onto the semiconductor surface.

4. The presence of semiconductor layer shorted by metal shunts that can be caused by the deposition of metal atoms on dislocations or other structural defects [19]. This case is high probably for indium nitride films with high density of structural defects. It was confirmed that the increasing temperature dependences of the contact resistivity $\rho_c(T)$ obtained for ohmic contacts to InN can be explained by current flow through dislocations associated with metal shunts [20].

To date, the temperature dependence of ohmic metal/InN contacts resistivity (ρ_c) is not fully investigated. For fixed values of the barrier height and carrier concentration, the temperature

dependence of contacts resistivity determines the carrier transport mechanism through the metal/semiconductor interface. The field emission is one of the frequently occurred transport mechanisms due to heavily doped semiconductor films [21–24].

The anomalous increase in the temperature dependence of contact resistivity, $\rho_c(T)$, was obtained by the authors of [25, 26], who attempted to explain the increase by the metallic conductivity in degenerate InN [26]. However, no direct measurements of $\rho_c(T)$ were performed in this work. In addition, the affect of a high density of structural defects was not taken into account.

The necessity of structural studies for fully understanding the carrier transport mechanisms of ohmic contacts to InN-based films was demonstrated in [27]. Investigation of Ti/Al/Au ohmic contacts to InAlN/AlN/GaN found a significant influence the TiN contact inclusions (spike) in GaN layers on a current flow.

Prior to metal deposition the surface treatment of InN films usually can be carried out in several steps each of which performs a separate problem [22, 28–30]. In many cases the first step is the removing native oxides by dipping the samples in $\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_4\text{OH}(20:1)$ for 1 min. Subsequently, the second step is the etching in $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} (1:3)$ solution to remove the possible In on the top surface. For the third step $\text{HF}:\text{H}_2\text{O} (1:50)$ are used. Finally, InN films are rinsed with deionizer water.

For the correct selection of contact metal a host of factors must be considered. There are the distinctive features of semiconductor that define the bending of energy bands in the surface region of the semiconductor; the adhesion of metal to a semiconductor; the lattice mismatch effect in metal/semiconductor interface (the parameters of commonly used metals for creating ohmic contacts to InN, are shown in the **Table 2**), etc.

However, all of the above requirements are insufficient for creating the low resistance ohmic contact. One possibility is that the rectifying contact can be formed after metal deposition onto unwarmed substrate. In this case rapid thermal annealing (**RTA**) is used for manipulating of the height and width of potential barrier due to the forming n^+ and p^+ layers. However, the relatively low temperature of InN dissociation (630°C in vacuum and 500°C in an atmosphere of N_2 [3]) must be consider during the thermal treatments. Investigation of surface morphology and elemental composition of single crystal indium nitride surface [31, 32] confirm low thermal stability compared to the other compounds of III-nitride group. The degradation of structure was observed during thermal treatments in a nitrogen atmosphere at temperatures above 550°C due to InN dissociation and subsequent N loss from the nitride surface are found to occur.

Thus, the formation of ohmic contacts to InN is a sequence of complex processes that is

Table 2

Parameters of metals and alloys used for forming ohmic contacts to InN*

Metal	W , eV	Melting point, °C	a_0 , nm	α , $\cdot 10^{-6}/K^{-1}$	ρ , $\Omega \cdot \mu m$
Ag	4.30	960	0.409	18.90	0.015
Al	4.25	660	0.405	22.30	0.026
Au	4.25	1063	0.408	14.00	0.023
Hf	3.80	2230	0.319	6.00	
Mo	4.30	2620	0.315	5.27	0.050
Nb	3.95–4.87	2468	0.330		0.152
Ni	4.50	1453	0.352	13.20	0.068
Pb	4.20	327	0.495	28.30	0.190
Pd	4.80	1550	0.389	11.75	0.108
Pt	5.32	1770	0.392	9.50	0.098
Ta	4.12	2996	0.331	6.60	0.124
Ti	3.95	1608	0.295	8.10	0.470
Zr	3.90	1855	0.323	7.36 – 4.99	0.410
V	4.30	1887	0.302	10.60	0.248
W	4.54	3400	0.316	4.40	0.055
WSi ₂	4.05	2160			
TiB ₂	3.80	2790	0.323	5.50	
TiN	2.92–4.09	2950		4.70	

* W – work function of the metal, ρ – resistivity.

caused by the necessity to take into account the distinctive features of a semiconductor and wide set of requirements that the contact must meet. The main requirements can be classified as follows:

1. Technological requirements:

- avoidance of device characteristics changing during the formation of contacts;
- possibility of selective etching of metals in the process of photolithography;
- ability to use of technological impacts for controlled change of electrophysical contact characteristics;
- manufacturing process of that contacts must be as simple as possible and consistent with the production of semiconductor.

2. Electric requirements:

- sufficiently low contact resistivity for avoidance of a significant voltage drop at the contact and its additional heating;
- symmetric and linear I - V characteristics in a range of operating currents;
- avoidance of minority-carrier injection.

3. Requirements for reliability:

- stability of contact properties to prolonged electrical and thermal loads during operation;
- reasonable adhesion of contact metal to InN;

- use of materials with similar thermal expansion coefficient and crystal lattice parameters;
- preservation of the contact structural homogeneity during long-term operation of the device for avoiding substantial change in contact parameters.

Minimal ohmic contact resistivity limits to n -InN

The contact resistivity is an important parameter characterizing the metal/semiconductor interfaces. It consists of near-contact area resistivity of semiconductor and series connecting resistivity caused by current flow over the potential barrier. Minimal ohmic contact resistivity limits ($\rho_{c \min}$) to widely used n -type semiconductors was derived in [33], giving the lowest possible ohmic contact resistivity for nondegenerate and degenerate metal–semiconductor. It was assumed that the potential barrier is absent during the semiconductor–metal current flow and probability of tunneling in the same direction tends to 1.

In accordance with this assumption the final minimal contact resistivity $\rho_{c \min}$ is:

$$\rho_{c \min} = \frac{k}{qAm^*T} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) = \frac{k}{qAm^*T} \cdot \frac{N_c}{N_d}, \quad (1)$$

where k – Boltzmann's constant;
 q – elementary electric charge;
 A – Richardson constant ($A = 120 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$);
 $m^* = m_e/m_0$, m_e and m_0 – effective mass and free electron mass respectively;
 T – temperature;
 $N_c = 2(2\pi kTm^*/h^2)^{3/2}$ – effective density of states in the conduction band;
 N_d – electrically active bulk doping concentration.

In compliance with [33], we estimated the minimal ohmic contact resistivity limits in case of n -InN:

$$\rho_{c \min} = 1.15 \cdot 10^9 [\text{Ohm} \cdot \text{cm}^{-1} \text{K}^{-1/2}] \frac{\sqrt{T} [\text{K}^{1/2}]}{N_d [\text{cm}^{-3}]} \quad (2)$$

For instance, the obtained minimal contact resistivity is $3.91 \cdot 10^{-8} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$ for $N_d = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ at $T = 300 \text{ K}$.

Contacts based on a single-layer metallization

The most simple in terms of technology and low-cost variant is the formation of ohmic contacts based on single-layer metal structures. For selection of such metal structures one gives the most important attention to the next parameters. There are conductivity, adhesion to a semiconductor, electron work function and metal melting point.

The wolframium (W) and wolframium silicide (WSi_x) layers are the most common single-layer ohmic contacts to the n -InN. Previously these metal layers take priority during choosing the

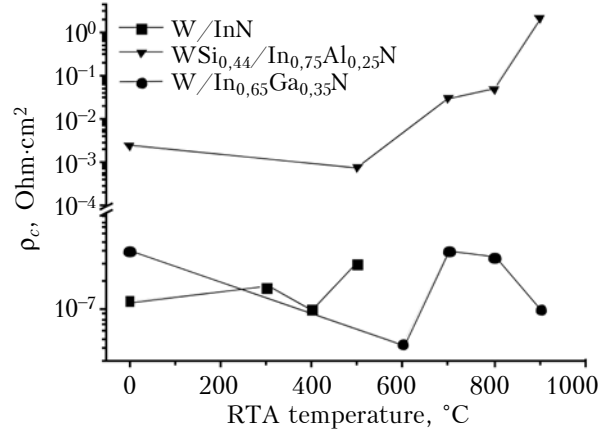


Fig. 2. Contact resistivity for W, WSi_x contacts as a function of annealing temperature [28, 29]

material for forming single-layer ohmic contacts to the n -InN due to the low resistivity and high melting point (Table 2).

The conducted in [21, 22, 28, 29, 34, 35] studies of $\text{W}/n\text{-InN}$ and $\text{WSi}_x/n\text{-InN}$ indicate the high thermal stability of these structures. The physical properties of the obtained contacts to InN , $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ and $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ films degraded after RTA at temperature higher than 400°C , 500°C and 600°C , respectively [28, 29]. It was confirmed by the sharp contact resistivity increasing after appropriate thermal treatments (Fig. 2).

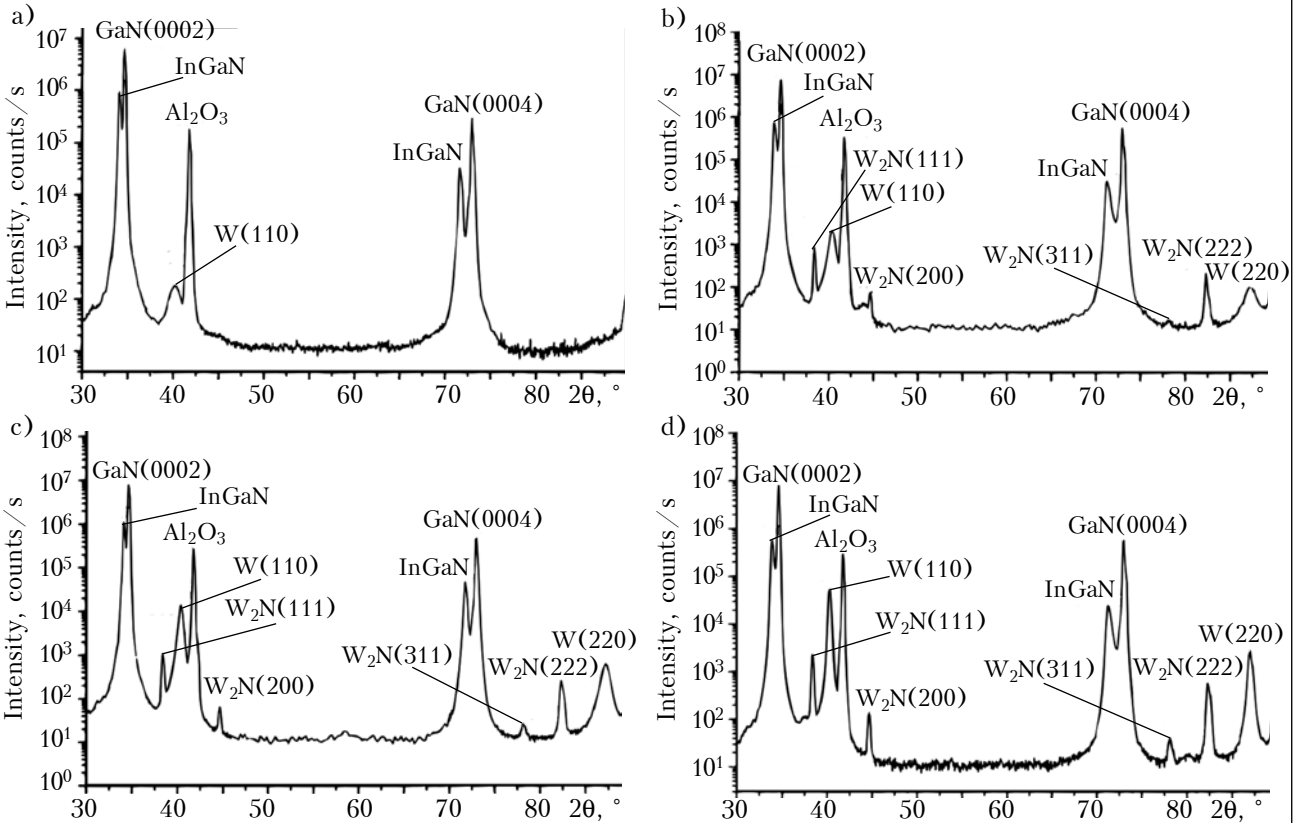


Рис. 3. XRD data for the W/InGaN samples as-deposited (a) and annealed at 500°C (b), 700°C (c), and 950°C (d) [34]

One of the main causes of contact resistance decreasing during RTA for contacts based on single-layer metallization (W, WSi_x) could be forming of the interfacial phase of wolframium nitride (W₂N), its appearance was confirmed by X-ray diffraction studies (**Fig. 3**). W₂N was formed after RTA at 500°C. In addition, the interfacial W₂N phase became better defined with increasing temperature, indicating the occurrence of the more extensive interfacial reactions. This indicates that the nitrogen is outdiffused from a semiconductor, resulting in the accumulation of nitrogen vacancies near the semiconductor surface. These nitrogen vacancies are likely to act as donors. Thus, the increase in the carrier concentrations near the surface layer is responsible for the improved *I-V* characteristics.

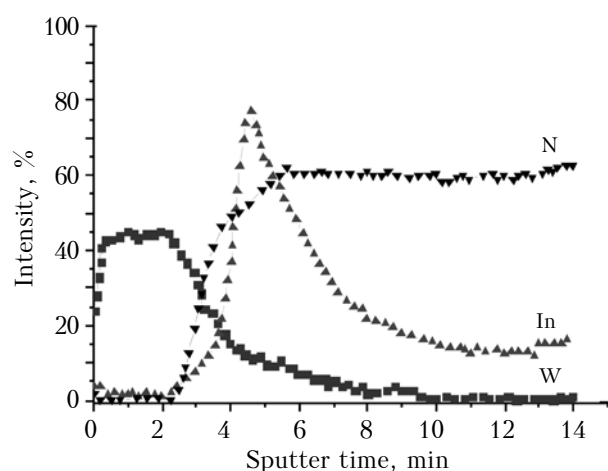


Fig. 4. AES depth profiles of W/InN after RTA at 500°C [21]

A major disadvantage of such contact-layer formation is the considerable thickness of heterogeneous interface formed after RTA, it is confirmed by AES depth profiles (**Fig. 4**) [21]. Therefore, these contacts are not suitable for all modern semiconductor devices that often require the unfloatable ohmic contacts with thin boundary dividing metal and semiconductor. The main work directions on these problems are introduction additional layers of metallization and reduction the temperature of annealing treatment or complete exclusion of RTA.

Bilayer ohmic contacts based on Al, Ni, Ti

Ti-based ohmic contacts to *n*-InN are widely distributed due to high melting point of this metal (1608°C), low resistance and crystal growth parameters related with InN. However, Ti layer has high propensity to oxidation (the formation of high-resistance titanium oxide compounds). Thus, it is used with Al or Au top layers to prevent diffusion of titanium on the surface and its oxidation. Minimal contact resistivity $1.2 \cdot 10^{-7} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$ of such structures was obtained after 500°C RTA for 15 s (**Table 3**) [21]. A further increase of the annealing temperatures (600°C) leads to abrupt increase of the values of ρ_c . A more detailed analysis of Ti/InN interface found the diffusion of Ti into semiconductor and significant diffusion of In via metallization after thermal treatments at 300°C for 60 s [25]. The limited temperature stability could be caused by a high tendency of these metals to oxidation or a relatively low melting point Al (660°C) and high probability formations of Al droplets on the surface.

Table 3

Survey of literature data on bilayer ohmic contacts to *n*-type InN

Metal layers	Semiconductor hetero-structure	Layer thickness, nm	Donor concentration, cm ⁻³	Minimal resistivity, Ohm·cm ²	Treatment	Reference
Ti/Al	<i>n</i> +InN/GaAs	20/100/200	10 ²⁰	$1.2 \cdot 10^{-7}$	RTA 500°C, 15 s	[20]
Ti/Al	<i>n</i> +In _{0.65} Al _{0.35} N/GaAs	20/100/200	$8 \cdot 10^{18}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	RTA 450°C, 15 s	[20]
Ti/Al	<i>n</i> +In _{0.75} Ga _{0.25} N/GaAs	20/100/200	10 ¹⁹	$2.0 \cdot 10^{-7}$	RTA 600°C, 15 s	[21]
Ti/Al	InN/GaN	20/100/100	10 ¹⁹	$6.0 \cdot 10^{-5}$	RTA 500°C	[35]
Ti/Au	InN/AlN	100/200/1000/250	$2 \cdot 10^{18}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$	non-annealed	[17]
Al/Au	InN/GaN/Al ₂ O ₃	100/200/1000/220	$1.49 \cdot 10^{18}$	$1.9 \cdot 10^{-6}$	non-annealed	[17]
Ni/Au	InN/AlN/Al ₂ O ₃	100/200/1000/200	$2.28 \cdot 10^{18}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$	non-annealed	[17]
Ni/Ag	InN/GaN/Al ₂ O ₃	—	—	$3.5 \cdot 10^{-2}$	TA 400°C, 30 min	[29]

Low values of the contact resistivity were achieved in [17] for non-annealed contacts. The authors associated this data to the existence of high-density surface charge in InN films, it is about $4.3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. Probably, it is a crucial point in the formation of the ohmic contacts with Al, Ni, Ti contact layers immediately after the deposition of metallization on InN without subsequent annealing. However, in that work any structural research and temperature studies of electrical properties were not carried out thus the reliability and stability of such contacts is not completely investigated.

Barrier layer as part of multilayer contact metallization to *n*-InN

Modern researches of ohmic contacts argue about the feasibility and prospects of using multilayer contact structure [37]. As has been noted above, similar structure may consist of several metallic layers for various purposes.

The barrier layer is one of the most important part of multilayer contact metallization. It is generally a polycrystalline layer of refractory metal and alloy (Ni, Ti, Pt) [25, 26, 38, 39] or boride nanocrystalline layer of refractory metal (for example, TiB_2) [23].

Ti/Al/Ni/Au and Ti/Al/ TiB_2 /Ti/Au ohmic contacts on *n*-type InN were compared [23]. These structures differ from each other only by the barrier layer. The minimum values of contact resistivity of $1.6 \cdot 10^{-6}$ and $6.0 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$ were obtained for the TiB_2 -based and Ni-based ohmic contacts, respectively. However, significant differences could be observed examining AES depth profiles after RTA at 400°C (Fig. 5). According to Fig. 5, Ni layer is an unable to cope with its main purpose, which leads to a significant mass transfer between the metallization layers and the semiconductor. In contrast, the TiB_2 -based ohmic contacts displayed thermal stability, suggesting that it is a better diffusion barrier than Ni. After RTA the TiB_2 -based contact structure much better maintains layered homogeneity. Thus thermal stability and reliability of the investigated contacts were generally defined by the barrier layer properties.

Comparing the optimal values of the contact resistivity for structures using barrier layers and other contact metallization (Fig. 6), we notice low values of the contact resistivity in a wide range of doping concentration obtained for ohmic contacts with barrier layers.

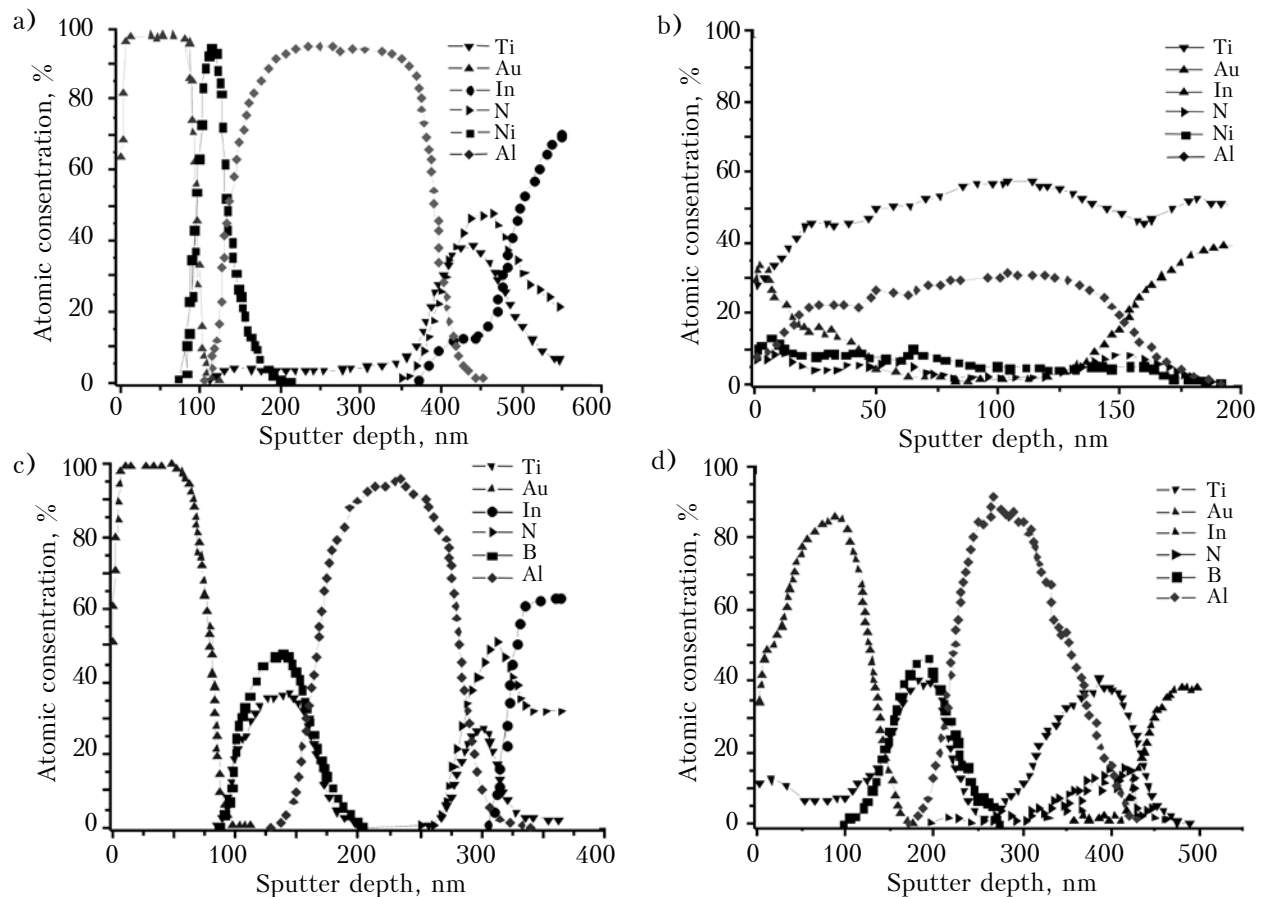


Fig. 5. AES depth profiles of multilayer metallization with barrier layers Ti/Al/Ni/Au (a, b) and Ti/Al/ TiB_2 /Au (c, d) as-deposited (a, c) and after RTA at 400°C (b, d) [23]

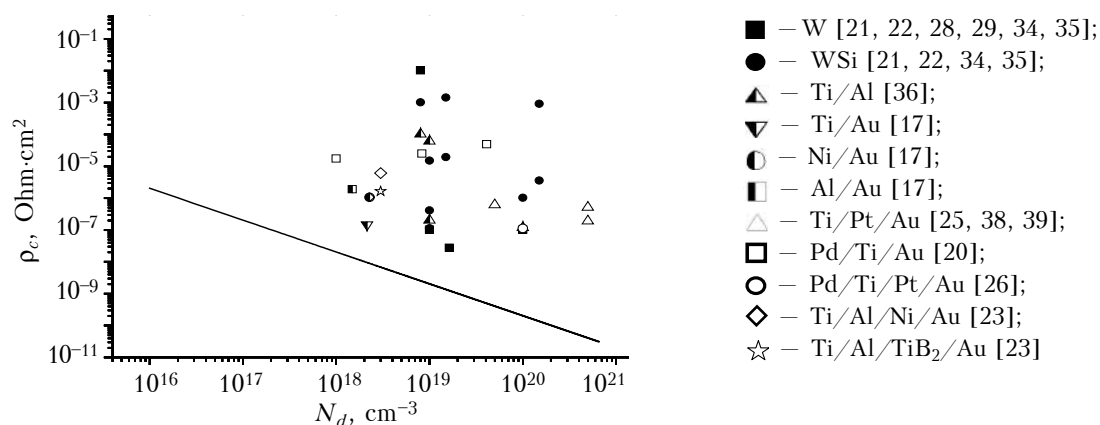


Fig. 6. Contact resistivity as a function of doping concentration: experimental data (dots) and theoretically calculated values of minimal contact resistivity (line)

Table 4

Survey of literature data on ohmic contacts to InAlN/GaN HEMTs

Metal layers	Semiconductor heterostructures*	Layer thickness, nm	Minimal resistivity	Treatment	Reference
Ti/Al/Ti/Au	In _{0.15} Al _{0.85} N(22.7)/GaN(2000)/SiC	20/100/45/55	430 Ohm·μm	RTA 850°C, 30 s	[41]
Ti/Au	InN(10)/InGaN(40)/GaN(20)/AlGaN/GaN(<i>n</i> -face)		27 Ohm·μm		[42]
Ti/Au	InAlN(2.5)/AlN(1.5)/GaN(200)/GaN(1600)/SiC		160 Ohm·μm		[43]
Ti/Al/Mo/Au	GaN(2)/In _{0.134} Al _{0.866} N(8)/AlN(1)/GaN(2000)/AlN(70)/SiC	16/64/30/50	300 Ohm·μm	RTA 860°C	[44]
Ti/Al/Ni/Au	In _{0.17} Al _{0.83} N(5)/AlN(1)/GaN(21)/AGaN(800)/SiC		410 Ohm·μm	RTA 830°C, 30 s	[46]
Ti/Al/Ni/Au	In _{0.18} Al _{0.82} N(9)/AlN(1)/GaN(2500μm)/Al ₂ O ₃	30/160/40/50	1.1·10 ⁻⁷ Ohm·cm ²	RTA 600°C, SiCl ₄ RIE	[46]
Mo/Al/Mo/Au	In _{0.17} Al _{0.83} N(5.6)/AlN(1)/GaN/6H-SiC	15/60/35/50	7.8·10 ⁻⁷ Ohm·cm ²	RTA 650°C 30 s, SiCl ₄ RIE	[48]
Ti/Al/Ni/Au	In _{0.17} Al _{0.83} N(10.2)/GaN(50)/GaN(1900)/Al ₂ O ₃		2·10 ⁻⁵ Ohm·cm ²	RTA 800°C 30 s, ICP-RIE	[49]
Ti/Al/Ni/Au	GaN(2.5)/In _{0.17} Al _{0.83} N(10.2)/GaN(50)/GaN(1900)/Al ₂ O ₃		3·10 ⁻⁵ Ohm·cm ²	RTA 800°C 30 s, ICP-RIE**	[50]
Ti/Al/Ni/Au	GaN(2)/In _{0.16} Al _{0.84} N()/AlN(1)/GaN(3000)/AlN(300)/Al ₂ O ₃	30/100/40/50	0.45 Ohm	RTA 800°C	[45]
Ti/Al/Au	In _{0.18} Al _{0.82} N(20)/AlN(1)/GaN(3600)/GaN(1000)/Al ₂ O ₃	30/70/70	5.28·10 ⁻⁴ Ohm·cm ²	RTA 850°C	[26]
Ti/Al/Ni/Au	In _{0.18} Al _{0.82} N (9)/AlN(1)/GaN(1300)/Si	25/200/40/100	4.75·10 ⁻⁶ Ohm·cm ²	RTA 800°C 60 s	[47]
Hf/Al/Ta	In _{0.18} Al _{0.82} N (9)/AlN(1)/GaN(1300)/Si	15/200/20	6.75·10 ⁻⁶ Ohm·cm ²	RTA 600°C 60 s	[50]

* Layer thickness are presented in nanometers;

** ICP-RIE – Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching.

Ohmic contacts to InAlN/GaN HEMTs

During the last decade the intensive research of InAlN/GaN heterostructure electrical parameters was conducted [27, 41–52], which is promising to create high electron mobility transistor (HEMT). Due to the better values of electron mobility and the possibility of high-density two-dimensional electron gas formation (2DEG), InAlN/GaN heterostructure is considered as an alternative to AlGaIn/GaN using for creating the basis for stronger HEMTs. Since these transistors work with high current density, the ohmic contacts to them first of all must withstand respective load. HEMT performance substantially depends on the parasitic resistance presence. Hence, as one of the priorities is reduction of the ohmic contact resistance.

One option for reducing the contact resistivity was the deposition of ohmic contacts onto thin 10 nm InN layer, which was epitaxial grown on GaN/InAlN heterostructure using graded $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (40 nm, $x = 0.01–0.26$) [43]. In this way, due to the existence of high-density surface charges in InN films, the reduction of Ti/Au ohmic contact resistivity was achieved to 27 $\Omega\cdot\text{m}$ compared to 160 $\Omega\cdot\text{m}$ [44] for similar contacts without the InN top layer.

Another approach to reduction of contact resistance was using SiCl_4 reactive ion etching (**SiCl₄-RIE**) InAlN surface before metal deposition [45, 46]. In case of Ti/Al/Ni/Au, it is possible to significantly reduce the ohmic contact resistivity ($1.1\cdot 10^{-7} \Omega\cdot\text{cm}^2$ after RTA at 600°C [47]) comparing to similar contacts without using SiCl_4 -RIE ($2\cdot 10^{-5} \Omega\cdot\text{cm}^2$ after RTA at 800°C [47]). That was related to following SiCl_4 -RIE advantages: the removing of the natural oxide from semiconductor surface; the removing of carbon impurities that accumulate on the surface during the epitaxial growth of InAlN by MOCVD; the thickness reduction of the potential barrier that allows electron tunneling through it.

Analyzing known contact metallization schemes to InAlN/GaN (**Table 4**), it is worth noting that the Ti/Al-based contact structures are widely spread. However, one of their distinctive feature is the possibility of contact inclusions or spikes formation after the high-temperature annealing which is required for the low-resistance ohmic contacts. The presence of such spikes was confirmed by transmission electron microscopy studies [27, 50]. According to the authors, Ti diffuse through InAlN layer, consequently TiN local inclusions were formed in GaN layer. The concentration of such inclusions exceed 10^8 cm^{-2} [27]. Whereas, that greatly affects the carrier transport mechanisms, since TiN acts as a carrier path leading between the metallization and the area of two-dimensional electron gas.

A sharp metal-semiconductor interface and avoidance significant interdiffusion between contacting layers were achieved by reduction

RTA temperature to 600°C using metallization of refractory metals Hf/Al/Ta [51, 52].

Conclusion

In this study, the key issues for ohmic contact formation to InN-based materials have been reviewed, focusing on the cases of *n*-type InN and InAlN/GaN heterostructures. A critical analysis of the main literature results reported in the last three decades allowed identifying the most suitable metallization structures and optimal annealing conditions for ohmic contact formation.

Two main stages can be associated with the developing of the contact metallization to *n*-InN that might be separated by the period of the reevaluation of semiconductor band gap and other essential parameters (effective electron mass, saturation velocity, mobility of electrons, etc.). In the first phase (90 years of XX century) interest in indium nitride was due to promising applications in the developing of some active elements for optoelectronics. Single-layer ohmic contacts based on W and WSi became the largest distribution during the first stage. Such type of metallization characterized by lowest optimal contact resistivity, however it requires high temperature annealing.

Since the beginning of the XXI century, indium nitride has been regarded as promising for high-speed semiconductor devices. Multi-layer metallization type with the barrier layers was used in case of InN. Thermal stability and reliability of whole metallization structure were generally defined by the barrier layer properties. The low contact resistance and superior thermal stability were achieved by using TiB_2 layers.

The mechanisms of current transport in the metal–InN structure aren't completely investigated due to the lack of information connected with temperature dependencies of contact resistivity and extended structural studies of semiconductor films.

The formation principles of ohmic contacts to InAlN/GaN heterostructures have the distinctive features. Using typical metallization based on Ti/Al mostly leads to the formation of contact inclusions or spikes that penetrate the InAlN layer. To avoid this in the current studies the following approaches were considered: using reactive ion etching InAlN surface before deposition ohmic contacts; search for alternative materials for contact metallization; using thin layers of refractory metals (Hf, Mo, Pd) to form a sharp boundary dividing «metal – semiconductor».

REFERENCES

1. Davydov V. Yu., Klochikhin A. A., Emtsev V. V., Kurdyukov D. A., Ivanov S. V., Vekshin V. A., Bechstedt F., Furthmüller J., Aderhold J., Graul J., Mudryi A. V., Harima H., Hashimoto A., Yamamoto A., and Haller E. E. Band Gap of Hexagonal InN and InGaIn Alloys // *Phys. stat. sol. (b)*, 2002, vol. 234, no 3, pp. 787-795. [http://dx.doi.org/10.1002/1521-3951\(200212\)234:3<787::AID-PSSB787>3.0.CO;2-H](http://dx.doi.org/10.1002/1521-3951(200212)234:3<787::AID-PSSB787>3.0.CO;2-H)

2. Wu J., Walukiewicz W., Yu K.M., Ager J.W., Haller E.E., Lu H., Schaff W.J. Unusual properties of the fundamental band gap of InN. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, vol. 80, no 21, pp. 3967-3969. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1482786>
3. Davydov V. Yu., Klochikhin A. A. [Electronic and vibrational states in InN and $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ solid solutions]. *Semiconductors*, 2004, vol. 38, iss. 8, pp. 861-898. <http://dx.doi.org/10.1134/1.1787109> (Rus)
4. Mudryi A.V., Ivanyukovich A.V., Korotkii A.V., Emtsev V.V., Yakushev [Optical properties of InN powder and films] *J Appl Spectrosc*, 2006, vol. 73, no 1, pp. 368-371. <http://dx.doi.org/10.1007/s10812-006-0041-0> (Rus)
5. Bhuiyan A. G., Hashimoto A., and Yamamoto A. Indium nitride (InN) : A review on growth, characterization, and properties. *J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 94, no 5, pp. 2779-2808. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1595135>
6. Hadi W. A., Guram P. K., Shur M. S., O'Leary S. K. Steady-state and transient electron transport within wurtzite and zinc-blende indium nitride. *J. Appl. Phys.*, 2013, vol. 113, no 11, pp. 113709-1 – 113709-6. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4795146>
7. O'Leary S. K., Foutz B. E., Shur M. S., Eastman L. F. Steady-state and transient electron transport within bulk wurtzite indium nitride: An updated semiclassical three-valley Monte Carlo simulation analysis. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, vol. 87, no 22, pp. 222103-1 – 222103-3. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2135876>
8. Feng Z. C. III-nitride semiconductor materials. Imperial College Press, Singapore, 2006.
9. Shubina T.V., Jmerik V.N., Shalygin V.A. et al. [Multifunctional metal-semiconductor nanocomposites] *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2010, vol. 74, no 1, pp. 68-71. <http://dx.doi.org/10.3103/S1062873810010168> (Rus)
10. Shubina T.V., Andrianov A.V., Zakhar'in A.O., Jmerik V.N., Soshnikov I.P., Komissarova T.A., Usikova A.A., Kop'ev P.S., Ivanov S.V., Shalygin V.A., Sofronov A.N., Firsov D.A., Vorob'ev L.E., Gippius N.A., Leymarie J., Wang X., Yoshikawa A. Terahertz electroluminescence of surface plasmons from nanostructured InN layers. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 96, no 18, pp. 183106. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3425897>
11. V. Lebedev, V. Cimalla, J. Pezoldt, M. Himmerlich, S. Krischok, J. A. Schaefer, O. Ambacher, F. M. Morales, J. G. Lozano, D. González. Effect of dislocations on electrical and electron transport properties of InN thin films. I. Strain relief and formation of a dislocation network. *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 100, no 9, pp. 094902-1 – 094902-13. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2363233>
12. Dimakis E., Domagala J.Z., Delimitis A., Komninou Ph., Adikimenakis A., Iliopoulos E., Georgakilas A. Structural properties of 10 μm thick InN grown on sapphire (0001). *Superlattices and Microstructures*, 2006, vol. 40, pp. 246–252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spmi.2006.09.012>
13. Wei-Li Chen, Yan-Hsin Wang, Ming-Fei Chen, Man-Fang Huang, Jenn-Chyuan Fan. Defect structure study of epitaxial InN films by transmission electron microscopy and X-ray diffraction. *Physica*, 2010, vol. 42, pp. 1463–1468. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physe.2009.11.117>
14. Gallinat C. S., Koblmaier G., Feng Wu, Speck J. S. Evaluation of threading dislocation densities in In- and N-face InN. *Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 107, no 5, pp. 053517-1 – 053517-8. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3319557>
15. M. Levinstein, S. Rumyantsev and M. Shur *Handbook Series on Semiconductor Parameters*. World Scientific, London, 1996, vol. 1, 2.
16. NSM Archive – Physical Properties of Semiconductors. <http://www.mattrop.ru>.
17. Lu H., Schaff W. J., Eastman L. F., Stutz C. E. Surface charge accumulation of InN films grown by molecular-beam epitaxy. *Applied physics letters*, 2003, vol. 82, no 11, pp. 1736-1738. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1562340>
18. Lebedev A.I. *Fizika poluprovodnikovyx priborov*. [Physics of semiconductor devices]. Moscow, Fizmatlit, 2008, 488 p. (Rus)
19. Blank T. V., Gol'dberg Yu. A. Mechanisms of current flow in metal-semiconductor ohmic contacts. *Semiconductors*, 2007, vol. 41, iss. 11, pp. 1263-1292. <http://dx.doi.org/10.1134/s1063782607110012>
20. Sachenko A. V., Belyaev A. E., Boltovets N. S., Brunkov P. N., Jmerik V. N., Ivanov S. V., Kapitanchuk L. M., Konakova R. V., Klad'ko V. P., Romanets P. N., Sai P. O., Safryuk N. V., Sheremet V. N. Temperature dependences of the contact resistivity in ohmic contacts to $n^+\text{-InN}$. *Semiconductors*, 2015, vol. 49(4), pp. 461-471. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782615040193>
21. Ren F., Vartuli C.B., Pearton S.A., Abernathy C.R., Donovan S.M., MacKenzie J.D., Shul R.J., Zolper J.C., Lovejoy M.L., Boy A.G., Hagerott-Crawford M., Jones K.A. Comparison of ohmic metallization schemes for InGaIn. *Vac. Sci. Technol. A*, 1997, vol. 15(3), pp. 802-806. <http://dx.doi.org/10.1116/1.580711>
22. Vartuli C.B., Pearton S.J., Abernathy C.R., MacKenzie J.D., Lovejoy M.L., Shul R.J., Zolper J.C., Baca A.G., Hagerot-Crawford M., Jones A., Ren F. Conduction mechanisms in W and WSi_x ohmic contacts to InGaN and InN. *Sol. Stat. Electron.* 1997, vol. 41(4), pp. 531-534. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-1101\(96\)00188-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-1101(96)00188-8)
23. Khanna R., Gila B. P., Stafford L., Pearton S. J., Ren F., Kravchenko I. I., Osinsky A. Thermal stability of Ohmic contacts to InN. *Applied physics letters*, 2007, vol. 90(16), pp. 162107-162107. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2724900>
24. Smith M. D., O'Mahony D., Conroy M., Schmidt M., Parbrook P. J. InAlN high electron mobility transistor Ti/Al/Ni/Au ohmic contact optimisation assisted by in-situ high temperature transmission electron microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 107, pp. 113506-113509. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4930880>
25. Ren F., Abernathy C. R., Pearton S. J., Wisk P. W. Thermal stability of Ti/Pt/Au nonalloyed ohmic contacts on InN. *Applied physics letters*, 1993, vol. 64(12), pp. 1508-1510. <http://dx.doi.org/10.1063/1.111874>
26. Chang C.-Y., Chi G.-C., Wang W.-M., Chen L.-C., Chen K.-H., Ren F., Pearton S.J. Transport properties of InN nanowires. *Applied physics letters*, 2005, 87(9), pp. 093112-1 – 093112-3. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2037850>
27. Kim S., Ryou J.-H., Dupuis R. D., and Kim H. Carrier transport mechanism of low resistance Ti/Al/Au ohmic contacts to AlInN/GaN heterostructures. *Applied physics letters*, 2013, vol. 102(5), pp. 052107-1 – 052107-4. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4790384>
28. Durba A., Pearton S.J., Abernathy C.R., Lee J.W., Holloway P.H., Ren F. Microstructural stability of ohmic contacts to $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1996, vol. 14(4), pp. 2582-2587, <http://dx.doi.org/10.1116/1.588771>

29. Varthli C.B., Pearton S.J., Abernathy C.R., MacKenzie J.D., Shul R.J., Zolper J.C., Lovejoy M.L., Baca A.G., Hagerott-Crawford M. Thermal stability of W, WSix, and Ti/Al ohmic contacts to InGa_N, InN, and InAlN. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1996, vol. 14(6), pp. 3520-3522, <http://dx.doi.org/10.1116/1.588791>
30. Chuah L. S., Hassan Z., Abu Hassan H. Effect of post annealing treatments on the characteristics of ohmic contacts to n-type InN. *ICSE2006 Proc*, 2006, pp. 614-617. <http://dx.doi.org/10.1109/SMELEC.2006.380705>
31. Qixin Guoa, Osamu Kato. Thermal stability of indium nitride single crystal films. *Journal of Applied Physics*, 1993, vol. 73(11), pp. 7969-7971. <http://dx.doi.org/10.1063/1.353906>
32. Vartuli C. B., Pearton S. J., Abernathy C. R., MacKenzie J. D., Lambers E. S. High temperature surface degradation of III-V nitrides. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1996, vol. 14(6), pp. 3523-3531. <http://dx.doi.org/10.1116/1.588792>
33. Kupka R. K., Anderson W. A. Minimal ohmic contact resistance limits to n-type semiconductors. *J. Appl. Phys.*, 1991, vol. 69, no. 6, pp. 3623-3632. <http://dx.doi.org/10.1063/1.348509>
34. Kim H.-K., Jang J.-S., Park S.-J., Seong T.-J. Electrical and structural properties of W ohmic contacts to InGa_N. *J. Electrochem. Soc.*, 2000, vol. 147(4), pp. 1573-1576. <http://dx.doi.org/10.1149/1.1393396>
35. Donovan S. M., MacKenzie J. D., Abernathy C. R., Pearton S. J., Ren F., Jones K., Cole M. Thermal stability of ohmic contacts to InN. *Solid-state electronics*, 1997, vol. 42(10), pp. 1831-1833. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-1101\(98\)00144-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-1101(98)00144-0)
36. Lin M.E., Huang F.J., Morkoc H. Nonalloyed ohmic contacts on GaN using InN/GaN shortperiod superlattices. *Applied physics letters*, 1994, vol. 64(19), pp. 2557-2559. <http://dx.doi.org/10.1063/1.111573>
37. S. N. Mohammad. Contact mechanisms and design principles for alloyed ohmic contacts to n-GaN. *J. Appl. Phys.*, 2004, vol. 95(12), pp. 7940-7953. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1712016>
38. Ren F., Abernathy C. R., Chu S. N. G., Lothian J. R., Pearton, S. J. Use of InN for Ohmic contacts on GaAs/AlGaAs heterojunction bipolar transistors. *Applied physics letters*, 1995, vol. 66(12), pp. 1503-1505. <http://dx.doi.org/10.1063/1.113669>
39. Abernathy C.R., Pearton S.J., Ren F., Wisk P.W. Growth of InN for ohmic contact formation by electron cyclotron resonance metalorganic molecularbeam epitaxy. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1993, vol. 11(2), pp. 179-182. <http://dx.doi.org/10.1116/1.586700>
40. Kazuhide Kumakura, Toshiki Makimoto, Naoki Kobayashi. Low-resistance nonalloyed ohmic contact to p-type GaN using strained InGa_N contact layer. *Applied physics letters*, 2001, vol. 79(16), pp. 2588-2590. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1410336>
41. Katz O., Misteale D., Meyler B., Bahir G., Salzman J. Characteristics of In_xAl_{1-x}N-GaN high-electron mobility field-effect transistor. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, vol. 52(2), pp. 146-150. <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2004.841281>
42. Jessen G. H., Gillespie J. K., Via G. D., Crespo A., Langley D., Aumer M. E., Ward C. S., Henry H. G., Thomson D. B., Partlow D. P. RF Power Measurements of InAlN/GaN Unstrained HEMTs on SiC Substrates at 10 GHz. *IEEE Electron Device Lett*, 2007, vol. 28(5), pp. 354-356. <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2007.895417>
43. Sansaptak Dasgupta, Nidhi, David F. Brown, Feng Wu, Stacia Keller, James S. Speck, and Umesh K. Mishra. Ultralow nonalloyed Ohmic contact resistance to self aligned N-polar GaN high electron mobility transistors by InGa_N regrowth. *Applied physics letters*, 2010, vol. 96(14), pp. 143504-1 – 143504-3. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3374331>
44. Yue Y., Sensale-Rodriguez B., Faria F., Fang T., Song B., Gao X., Guo S., Kosel T., Snider G., Fay P. InAlN/AlN/GaN HEMTs with regrown ohmic contacts and f_T of 370 GHz. *IEEE Electron Device Letters*, 2012, vol. 33(7), pp. 988-990. <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2012.2196751>
45. Pozzovivo G., Kuzmik J., Giesen C., Heuken M., Liday J., Strasser G., Pogany D. Low resistance ohmic contacts annealed at 600°C on a InAlN/GaN heterostructure with SiCl₄ -reactive ion etching surface treatment. *Phys. Status Solidi*, 2009, vol. 6, no. S2, pp. S999–S1002. <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200880839>
46. Lee J., Yan M., Ofuonye B., Jang J., Gao X., Guo S., Adesida I. Low resistance Mo/Al/Mo/Au ohmic contact scheme to InAlN/AlN/GaN heterostructure. *Phys. Status Solidi A* 208, 2011, no. 7, pp. 1538–1540, <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201001096>
47. Lo C.-F., Liu L., Chang C. Y., Ren F., Craciun V., Pearton S. J., Heo Y. W., Laboutin O., Johnson J. W. Annealing temperature dependence of Ohmic contact resistance and morphology on InAlN/GaN high electron mobility transistor structures. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2011, vol. 29(2), pp. 021002-1 - 021002-5, <http://dx.doi.org/10.1116/1.3545811>
48. Tirelli S., Marti D., Sun H. F., Alt A. R., Carlin J. F., Grandjean N., Bolognesi C. R. Fully passivated AlInN/GaN HEMTs with f_T/f_{MAX} of 205/220 GHz. *IEEE Electron Device Lett*, 2011, vol. 32(10), pp. 1364-1366. <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2011.2162087>
49. Lee D. S., Gao X., Guo S., Palacios T. InAlN/GaN HEMTs with AlGa_N back barriers. *IEEE Electron Device Letters*, 2011, vol. 32(5), pp. 617-619. <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2011.2111352>
50. Zhou L., Leach J. H., Ni X., Morkoc H., Smith D. J. Ti/Al/Ni/Au Ohmic contacts for AlInN/AlN/GaN-based heterojunction field-effect transistors. *Journal of Applied Physics*, 2010, no. 107, pp. 014508-1 - 014508-5. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3275241>
51. Liu Y., Singh S. P., Ngoo Y. J., Kyaw L. M., Bera M. K., Lo Q. Q., Chor E. F. Low thermal budget Hf/Al-Ta ohmic contacts for InAlN/GaN-on-Si HEMTs with enhanced breakdown voltage. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2014, vol. 32(3), pp. 032201-1 - 032201-7. <http://dx.doi.org/10.1116/1.4874599>
52. Liu Y., Singh S. P., Kyaw L. M., Bera M. K., Ngoo Y. J., Tan H. R., Tripathy S., Lo G. Q., Chor E. F. Mechanisms of ohmic contact formation and carrier transport of low temperature annealed Hf/Al-Ta on In_{0.18}Al_{0.82}N/GaN-on-Si. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2015, vol. 4(2), pp. P30-P35. <http://dx.doi.org/10.1149/2.0111502jss>

Received 12.07 2016.

П. А. САЙ

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

E-mail: pavel_sai@mail.ua

ОМИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ К МАТЕРИАЛАМ
НА ОСНОВЕ НИТРИДА ИНДИЯ

Рассмотрены ключевые моменты в формировании омических контактов к нитрид индиевых пленок, фокусируясь на $n\text{-InN}$ и InAlN/GaN гетероструктурах. Детальный анализ исследований, проведенных за последние три десятилетия, позволяет определить основные принципы формирования подобных контактов. Приведены параметры контактов и оптимальные условия их достижения, рассмотрены различные типы металлизации и определены преимущества и недостатки каждого из них, учитывая основные требования, которым подобные контакты должны отвечать. Сделан акцент на перспективах использования многослойной металлизации с диффузионными барьерами. Рассмотрены общие подходы к формированию омических контактов к InAlN/GaN -гетероструктур.

Ключевые слова: омический контакт, нитрид индия, удельное контактное сопротивление, быстрая термическая обработка.

DOI: 10.15222/ТКЕА2016.4-5.03
УДК 538.91

П. О. САЙ

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

E-mail: pavel_sai@mail.ua

ОМІЧНІ КОНТАКТИ ДО МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ НІТРИДУ ІНДІЮ

Нітрид індію, що є представником групи тринітридів, останнім часом викликає бурхливий інтерес серед дослідників з усього світу. Здебільшого це спричинено зростанням якості InN завдяки таким технологіям його вирощування, як металоорганічна газофазна епітаксія та молекулярно-пучкова епітаксія з плазмовою активацією азоту. Найнижче серед тринітридів значення ефективної маси електронів в поєднанні з високими значеннями швидкості насичення та рухливості електронів робить нітрид індію перспективним для розвитку високошвидкісної напівпровідникової електроніки. Використання $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ дозволяє перекрити весь видимий діапазон довжини хвиль, а $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ — діапазон довжини хвиль від інфрачервоного випромінювання до ультрафіолетового.

Критичною проблемою, що гальмує розвиток мікроелектроніки на основі InN , залишається складність створення омичного контакту до напівпровідникових плівок нітриду індію з високою густиною структурних дефектів. Подібні контакти мають задовольняти широкому спектру вимог. Насамперед, це технологічні вимоги до процесу їх виготовлення, до їх надійності та електрофізичних параметрів. Однак до тепер не було сформовано узагальненої картини фізичних процесів, що відбуваються в структурі «метал — InN » під час струмоперенесення, та не проведено огляд впливу технологічних умов на якість омичного контакту.

В даній роботі розглянуто ключові моменти в формуванні омичних контактів до нітрид-індієвих плівок, фокусуючись на гетероструктурах $n\text{-InN}$ і InAlN/GaN . Детальний аналіз досліджень, проведених за останні три десятиліття, дозволив визначити основні принципи формування подібних контактів. Наведено параметри контактів та оптимальні умови їх досягнення, розглянуто різні типи металізації і визначено переваги та недоліки кожного з них, враховуючи основні вимоги, яким подібні контакти мають відповідати. Наголошено на перспективах використання багаточарової металізації з дифузійними бар'єрами. Розглянуто загальні підходи формування омичних контактів до InAlN/GaN -гетероструктур.

Ключові слова: омичний контакт, нітрид індію, питомий контактний опір, швидка термічна обробка.

С. И. АЛТУНИН, д. т. н. А. П. БОНДАРЕВ

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»

E-mail: bondap@ukr.net, serg.alt.i@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОГРАММНО-АППАРАТНОМ УСТРОЙСТВЕ ЦИФРОВОЙ ФАЗОВОЙ АУТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Работа посвящена экспериментальному исследованию переходных процессов, возникающих в устройстве цифровой фазовой автоматической подстройки частоты (ЦФАПЧ) после замыкания петли обратной связи. Для решения поставленной задачи была выполнена программно-аппаратная реализация устройства ЦФАПЧ. В статье приведена структурная схема устройства и описана его математическая модель. Рассмотрен процесс захвата частоты гармонического колебания и проанализировано влияние основных параметров устройства (собственной частоты и коэффициента затухания) на продолжительность переходного процесса. Приведены графики ключевых сигналов устройства для оценки продолжительности переходного процесса. Результаты экспериментального исследования программно-аппаратного устройства ЦФАПЧ сопоставлены с результатами исследования его имитационной модели.

Ключевые слова: программно-аппаратная реализация, ЦФАПЧ, переходный процесс, частотная и фазовая ошибка синхронизации, коэффициент затухания, резонансная частота.

В последнее время цифровые устройства фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) стали очень популярными в радиоэлектронной технике и используются в большинстве современных радиоприемников различного назначения. Постепенно они вытесняют традиционные аналоговые устройства ФАПЧ, поскольку благодаря использованию цифровых компонентов отпадает проблема паразитных емкостей, старения и температурного дрейфа характеристик цифровых устройств фазовой синхронизации [1]. Более того, цифровые устройства ФАПЧ (ЦФАПЧ) весьма перспективны с точки зрения их потенциально высокой помехоустойчивости [2].

Целью настоящей работы является программно-аппаратная реализация устройства ЦФАПЧ, поскольку это позволит оперативно изменять параметры устройства для дальнейшего исследования и повышения его помехоустойчивости. Кроме того, в работе исследован процесс захвата частоты гармонического колебания, а именно — определение времени вхождения в син-

хронизм и характера его изменения с изменением ключевых параметров устройства ЦФАПЧ, а также сравнение этого времени с результатом исследования имитационной модели (при одинаковых параметрах и начальных условиях), полученным в [3].

Структура цифрового устройства ФАПЧ и принцип его работы

Для осуществления программно-аппаратной реализации за основу была принята структурная схема устройства ЦФАПЧ, приведенная в [3] (рис. 1).

Эта схема очень похожа на схему аналогового устройства ФАПЧ, но в данном устройстве ЦФАПЧ основные компоненты — фазовый детектор (ФД), цифровой фильтр (ЦФ) и генератор, управляемый напряжением (ГУН), — реализованы программно, и все они оперируют цифровыми сигналами. Кроме того, здесь присутствует аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), предназначенный для дискретизации сигнала с эталонного генератора $s_{\text{вх}}(t)$, и цифро-

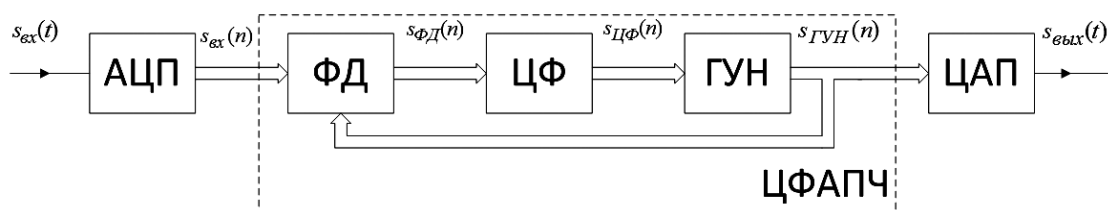


Рис. 1. Структурная схема устройства ЦФАПЧ

аналоговый преобразователь (ЦАП), на выходе которого получаем непрерывный сигнал $s_{\text{вых}}(t)$. Особенностью проведенной реализации является то, что частота дискретизации в АЦП и ЦАП значительно превышает частоту, которая необходима в соответствии с теоремой Котельникова.

Математическая модель этого ЦФАПЧ подробно описана в [3], здесь же приведем только основные выражения.

Пусть интервал дискретизации равен ΔT , коэффициенты передачи ГУН и ФД — K_0 и $K_{\text{ФД}}$ соответственно, опорная частота ГУН — ω_0 .

Передающая функция устройства ЦФАПЧ имеет вид

$$H(z) = \frac{\Psi(z)}{\Phi(z)} = \frac{K_{\text{ФД}} H_{\text{ЦФ}}(z) H_{\text{ГУН}}(z)}{1 + K_{\text{ФД}} H_{\text{ЦФ}}(z) H_{\text{ГУН}}(z)}, \quad (1)$$

где $\Psi(z)$ и $\Phi(z)$ — z -образы фазовых сигналов $\varphi(n)$ и $\psi(n)$.

Передающая функция ГУН:

$$H_{\text{ГУН}}(z) = \frac{K_0 z^{-1}}{1 - z^{-1}}. \quad (2)$$

В качестве ЦФ используем рекурсивный фильтр первого порядка, передающая функция которого имеет вид

$$H_{\text{ЦФ}}(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1}}, \quad (3)$$

где b_0, b_1, a_1 — коэффициенты.

Определить коэффициенты ЦФ можно на основании размещения полюсов и нулей передающей функции ЦФАПЧ. Для этого в [4] предложено взять за основу передающую функцию аналоговой ФАПЧ второго порядка астатизма ($H(s)$), и найти ее нули (s_0) и полюсы (s_1, s_2):

$$H(s) = \frac{2\zeta\omega_p s + \omega_p^2}{s^2 + 2\zeta\omega_p s + \omega_p^2}; \quad (4)$$

$$s_0 = -\frac{\omega_p}{2\zeta}; \quad (5)$$

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_p \pm j\omega_p \sqrt{1 - \zeta^2}, \quad (6)$$

где ω_p — резонансная частота контура ФАПЧ;

ζ, s — соответственно, коэффициент затухания и комплексная переменная [1, с. 33–35].

Отметим, что эти выражения справедливы только для случая, когда в качестве фильтра использовано пропорционально-интегрирующее звено с передающей функцией $K_S = m + 1/(sT_1)$ (m — коэффициент пропорциональности, T_1 — постоянная времени интегратора), а также для других фильтров первого порядка при выполнении условия [1, с. 33]

$$\omega_p \ll K_0 K_{\text{ФД}}. \quad (7)$$

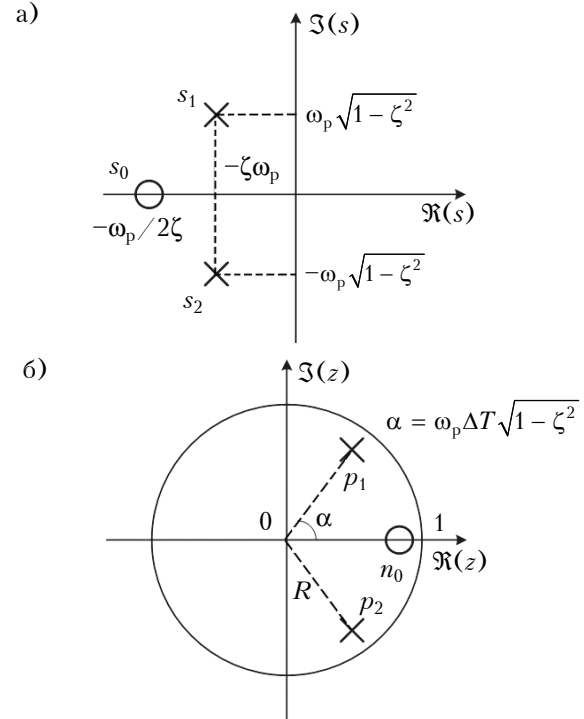


Рис. 2. Отражение полюсов и нуля аналоговой ФАПЧ (а) в полюсы и ноль ЦФАПЧ (б) при заданных параметрах модели $\zeta, \omega_p, \Delta T$

Методом билинейного z -преобразования перейдем к нулям (n_0) и полюсам (p_1, p_2) ЦФАПЧ:

$$n_0 = \exp(s_0 \Delta T) = \exp\left(-\frac{\omega_p \Delta T}{2\zeta}\right); \quad (8)$$

$$\begin{aligned} p_{1,2} &= \exp(s_{1,2} \Delta T) = \\ &= \exp(-\zeta\omega_p \Delta T) \exp(\pm j\omega_p \Delta T \sqrt{1 - \zeta^2}) = \\ &= R \exp(\pm j\omega_p \Delta T \sqrt{1 - \zeta^2}), \end{aligned} \quad (9)$$

где $R = \exp(-\zeta\omega_p \Delta T)$.

Графически это преобразование приведено на рис. 2, где изображено размещение нулей и полюсов аналоговой ФАПЧ в s -плоскости и соответствующие им полюсы ЦФАПЧ в z -плоскости.

Исследуемое устройство ЦФАПЧ будет всегда устойчивым, т. к. для любых положительных значений $\zeta, \omega_p, \Delta T$ выполняется условие $R < 1$, а значит, полюсы его передающей функции всегда будут находиться внутри области $|z| < 1$.

Подставляя формулы (2) и (3) в выражение (1) и проведя ряд преобразований, передающую функцию устройства ЦФАПЧ приведем к виду

$$H(z) = \frac{z - n_0}{(z - p_1)(z - p_2)}. \quad (10)$$

Подставляя в это выражение уравнения (8) и (9), раскрыв скобки и приравняв соответству-

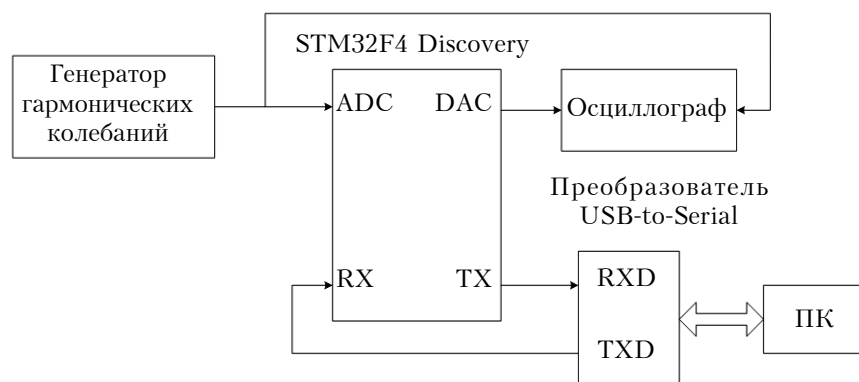


Рис. 3. Блок-схема эксперимента:

ADC — вход АЦП; DAC — выход ЦАП; RX — вход приемника микроконтроллера; TX — выход передатчика микроконтроллера; RXD — вход приемника преобразователя; TXD — выход передатчика преобразователя

ющие коэффициенты при z , получим систему уравнений

$$\begin{cases} b_1 = -b_0 \exp(-\omega_p \Delta T / (2\zeta)); \\ a_1 + 1 - K_{ФД} K_0 b_0 = \\ = 2 \exp(-\omega_p \zeta \Delta T) \cos(\omega_p \Delta T \sqrt{1 - \zeta^2}); \\ a_1 + K_{ФД} K_0 b_1 = \exp(-2\omega_p \zeta \Delta T). \end{cases} \quad (11)$$

Аналитическое решение этой системы уравнений в общем виде является весьма громоздким. Однако, если учесть условие (7) и то, что для корректного преобразования s -плоскости в z -плоскость устройства ЦФАПЧ практически всегда удовлетворяют требованию $\omega_p \ll (2\pi / \Delta T)$ [3], можно получить приближенные значения коэффициентов ЦФ:

$$b_0 = \frac{2 - 2 \exp(-\omega_p \zeta \Delta T) \cos(\omega_p \Delta T \sqrt{1 - \zeta^2})}{K_{ФД} K_0}; \quad (12)$$

$$b_1 = \frac{\exp(-2\omega_p \zeta \Delta T) - 1}{K_{ФД} K_0}; \quad (13)$$

$$a_1 = 1. \quad (14)$$

Проектирование аппаратной части устройства ЦФАПЧ

Программно-аппаратная реализация устройства ЦФАПЧ осуществлена на основе высокопроизводительной демонстрационной платы STM32F4 Discovery. Она содержит в себе микроконтроллер STM32F407VGT6, созданный на базе 32-разрядного ядра ARM Cortex-M4F, с объемом флеш-памяти 1 Мбайт и оперативной памяти 192 Кбайт, встроенные 12-разрядные АЦП и ЦАП, до 14 таймеров различного назначения, большое количество портов ввода-вывода и поддерживает несколько протоколов обмена данными (UART, SPI, I²C, USB) [5, с. 1]. Максимальная тактовая частота контроллера достигает 168 МГц, при этом время преобразо-

вания АЦП составляет около 0,5 мкс, что вполне достаточно для программно-аппаратной реализации ЦФАПЧ.

На рис. 3 приведена блок-схема эксперимента. Гармонический сигнал поступает на один из портов микроконтроллера, который является одновременно входом АЦП. АЦП формирует выборки входного сигнала с периодом, равным фиксированному интервалу дискретизации, который значительно меньше Котельниковского. После завершения обработки сигнала на выходе ЦАП получаем со-

ответствующий аналоговый сигнал, который поступает на осциллограф.

Для фиксации процесса захвата частоты необходимо в блок-схему включить компьютер (ПК). В том случае, когда необходимо снять осциллограммы одновременно нескольких сигналов, удобно записывать значение их выборок в память микроконтроллера (в ходе выполнения программы), а затем передать в компьютер (через интерфейс UART) для дальнейшего построения графиков.

Разработка программного обеспечения

Программное обеспечение (ПО) разработано в среде Keil μ Vision 5.15 с использованием стандартной библиотеки периферии SPL. Алгоритм его работы изображен на рис. 4, а.

Для сравнения результатов исследования процесса захвата синхронизма в имитационной и экспериментальной моделях крайне важно обеспечить идентичность начальных условий — частотной и фазовой расстройки. С этой целью был создан уникальный интерфейс для взаимодействия микроконтроллера с компьютером. Изначально контур ЦФАПЧ является разомкнутым (генерация сигнала с ГУН не происходит). В определенный момент времени на компьютере в среде MATLAB запускается программа, которая передает по каналу данных через интерфейс UART значение фазовой расстройки и тем самым подает команду микроконтроллера замкнуть контур ЦФАПЧ. В ходе выполнения программы (в микроконтроллере), в память записываются массивы значений переменных, характеризующих выборки соответствующих сигналов в дискретные моменты времени. После окончания записи эти данные передаются обратно в компьютер, где с помощью программы в среде MATLAB строятся графики сигналов и рядом с ними выводятся графики тех же сигналов для имитационной модели (при тех же параметрах и начальных условиях). Такое представление сигналов дает возможность быстро сравнить ре-

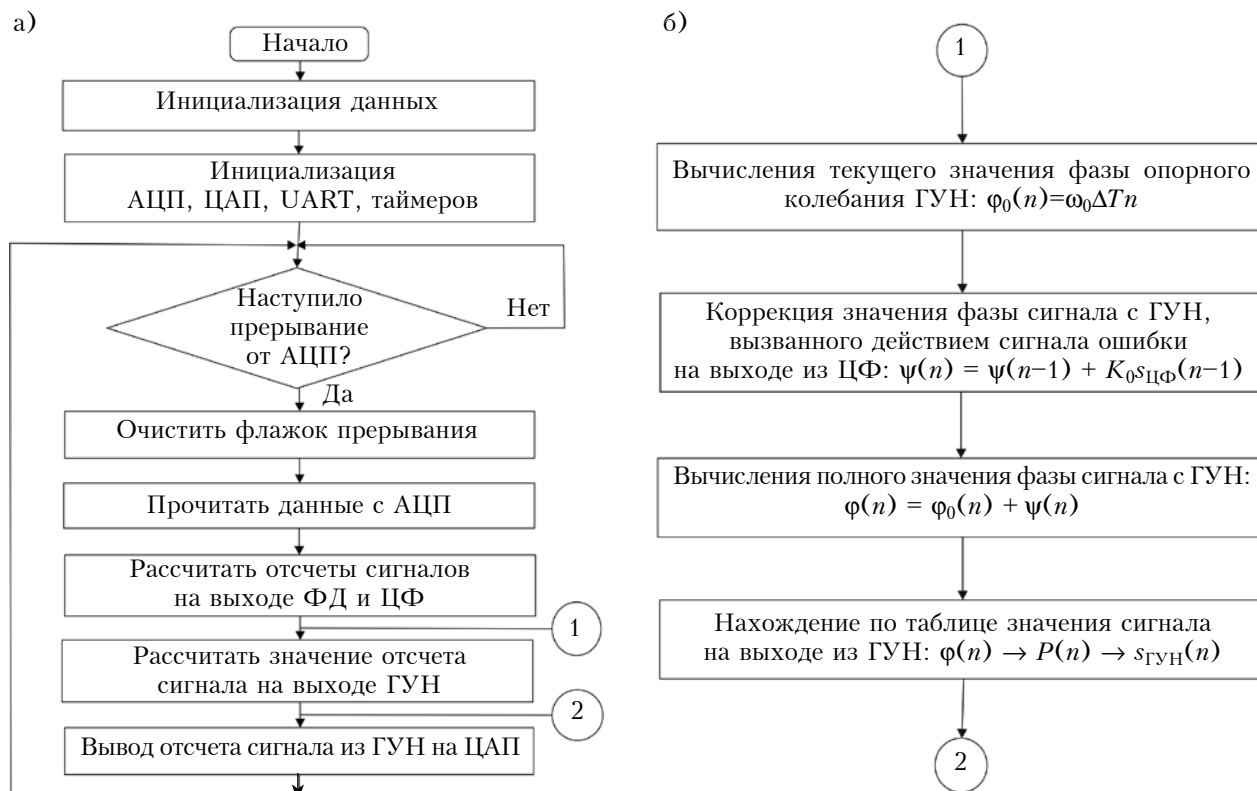


Рис. 4. Алгоритм работы программного обеспечения в целом (а) и алгоритм работы ГУН (б)

результаты исследований программно-аппаратной реализации устройства ЦФАПЧ и соответствующей ей имитационной модели.

Обоснование алгоритма работы ГУН

ГУН рассматриваемого устройства ЦФАПЧ функционирует как классический прямой цифровой синтезатор (DDS) [5]. Его ключевыми элементами являются фазовый аккумулятор большой разрядности, где постоянно накапливается цифровой код (пропорциональный текущей фазе гармонического колебания) и преобразователь «фаза — уровень», где этот код превращается в цифровое значение отсчета синусоидального колебания. В общем случае такое преобразование осуществляется через выражение [5]

$$S(n) = \sin\left(2\pi \frac{P(n)}{2^j}\right), \quad (15)$$

где $P(n)$ — текущее значение фазового аккумулятора;

j — разрядность фазового аккумулятора.

Поскольку алгоритм работы ГУН сложнее, чем ФД и ЦФ, механизм вычисления отсчетов сигнала на выходе из ГУН показан отдельно на рис. 4, б.

Первым действием в ГУН является вычисление полного значения фазы выходного сигнала $\varphi(n)$. При разомкнутом контуре устройства ГУН работает на своей опорной частоте, которая

в данном случае равна частоте дискретизации, а фаза нарастает в соответствии с выражением $\varphi(n) = \varphi_0(n) = \omega_0 \Delta T n = \varphi_0(n-1) + \omega_0 \Delta T$. (16)

Если же на вход ГУН поступает сигнал ошибки $s_{\text{ЦФ}}(n)$, то прирост этой фазы корректируется на значение [4]

$$\psi(n) = K_0 s_{\text{ЦФ}}(n-1) + \psi(n-1), \quad (17)$$

а полное мгновенное значение фазы будет равно

$$\varphi(n) = \varphi_0(n) + \psi(n) = \omega_0 \Delta T n + K_0 s_{\text{ЦФ}}(n-1) + \psi(n-1). \quad (18)$$

Для получения значения выборки сигнала на выходе ГУН нужно вычислить косинус фазы:

$$s_{\text{ГУН}}(n) = \cos(\varphi(n)). \quad (19)$$

Прямое вычисление тригонометрических функций средствами процессора (даже с помощью соответствующих библиотек) является довольно затратным и требует много времени. В то же время, аппаратная часть устройства ЦФАПЧ имеет достаточно большой объем памяти, позволяющий провести дискретизацию значения косинуса для большого количества значений аргумента (фазы). Так, на интервале значений аргумента $(0, \pi)$ было взято 4096 (2^{12}) точек, для них рассчитаны значения косинуса, которые затем были сохранены в массиве \cos_tab . Таким образом текущее значение фазы с помощью про-

граммы было превращено в его порядковый номер $P(n)$ в массиве `cos_tab`, а после этого — в конкретное значение отсчета выходного сигнала.

Отметим, что нет необходимости дискретизировать косинус для интервала значений аргумента $(\pi, 2\pi)$, поскольку им соответствуют те же значения из первого интервала, только со знаком «минус». Накладывая на массив данных маску 0×1000 , которая позволит получить соответствующий знак $\cos(\varphi(n))$, можно существенно сэкономить объем используемой памяти контроллера [4, с. 227]. Кроме того, поскольку со временем значение фазы $\varphi(n)$ непрерывно растет, для того чтобы значение индекса массива никогда не превышало 4095, на него накладывают маску $P(n) \& 0 \times 0FFF$. Аналитически это описывается выражениями

$$P(n) = \varphi(n) \cdot 2^{12} / \pi \text{ (округляется до целого); } (20)$$

$$s_{\text{ГУН}}(n) = \cos\left(\pi \frac{P(n)}{2^{12}}\right) = \cos_tab[P(n) \& 0 \times 0FFF] \cdot (-1)^{P(n) \& 0 \times 1000}. \quad (21)$$

Результаты исследования

Для идентификации параметров экспериментального устройства ЦФАПЧ было проведено его имитационное моделирование в среде MatLab. По результатам моделирования с помощью авторской программы, которая аналогична приведенной в [3], были получены зависимости для переходных процессов при $\Delta T = 50$ мкс, $f_0 = 1$ кГц, $K_{\text{ФД}} = K_0 = 250$ для различных наборов параметров ЦФАПЧ:

$$\begin{aligned} \omega_{p1} &= 2\pi \cdot 20 \text{ рад/с}, \quad \zeta_1 = 0,707; \\ \omega_{p2} &= 2\pi \cdot 200 \text{ рад/с}, \quad \zeta_2 = 0,707; \\ \omega_{p3} &= 2\pi \cdot 200 \text{ рад/с}, \quad \zeta_3 = 0,1. \end{aligned}$$

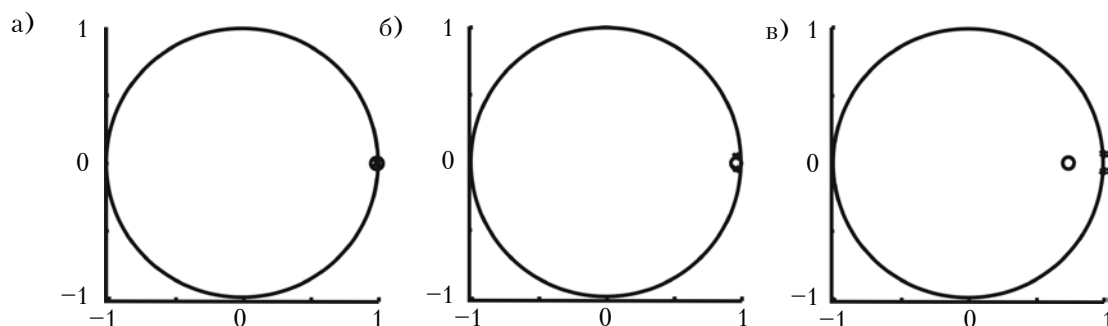
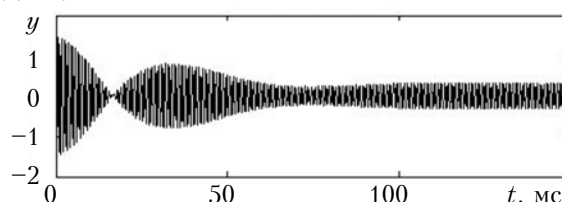
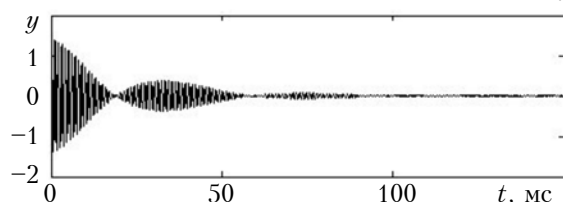


Рис. 5. Расположение нулей и полюсов ФАПЧ для различных значений его параметров: а — $\omega_{p1} = 2\pi \cdot 20$ рад/с, $\zeta_1 = 0,707$; б — $\omega_{p2} = 2\pi \cdot 200$ рад/с, $\zeta_2 = 0,707$; в — $\omega_{p3} = 2\pi \cdot 200$ рад/с, $\zeta_3 = 0,1$

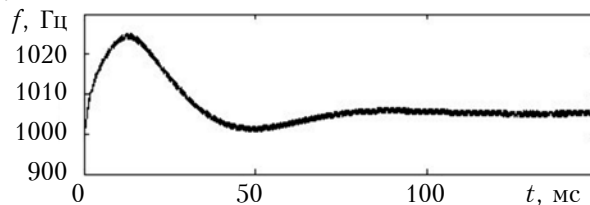
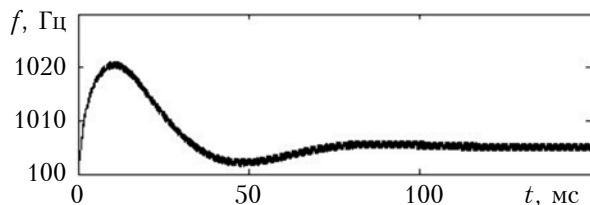
Имитационная модель

Экспериментальная модель

Ошибка слежения



Мгновенная частота



Фаза сигнала с ГУН

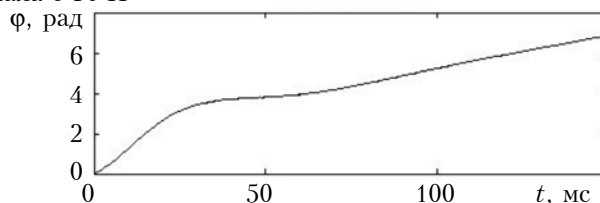
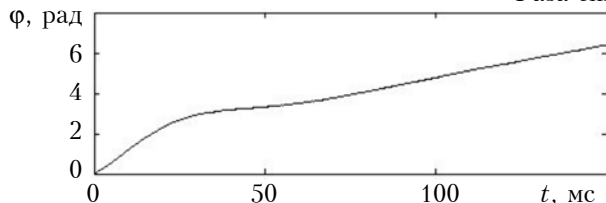


Рис. 6. Результаты исследования имитационной модели и экспериментального устройства при $\omega_{p1} = 2\pi \cdot 20$ рад/с, $\zeta_1 = 0,707$

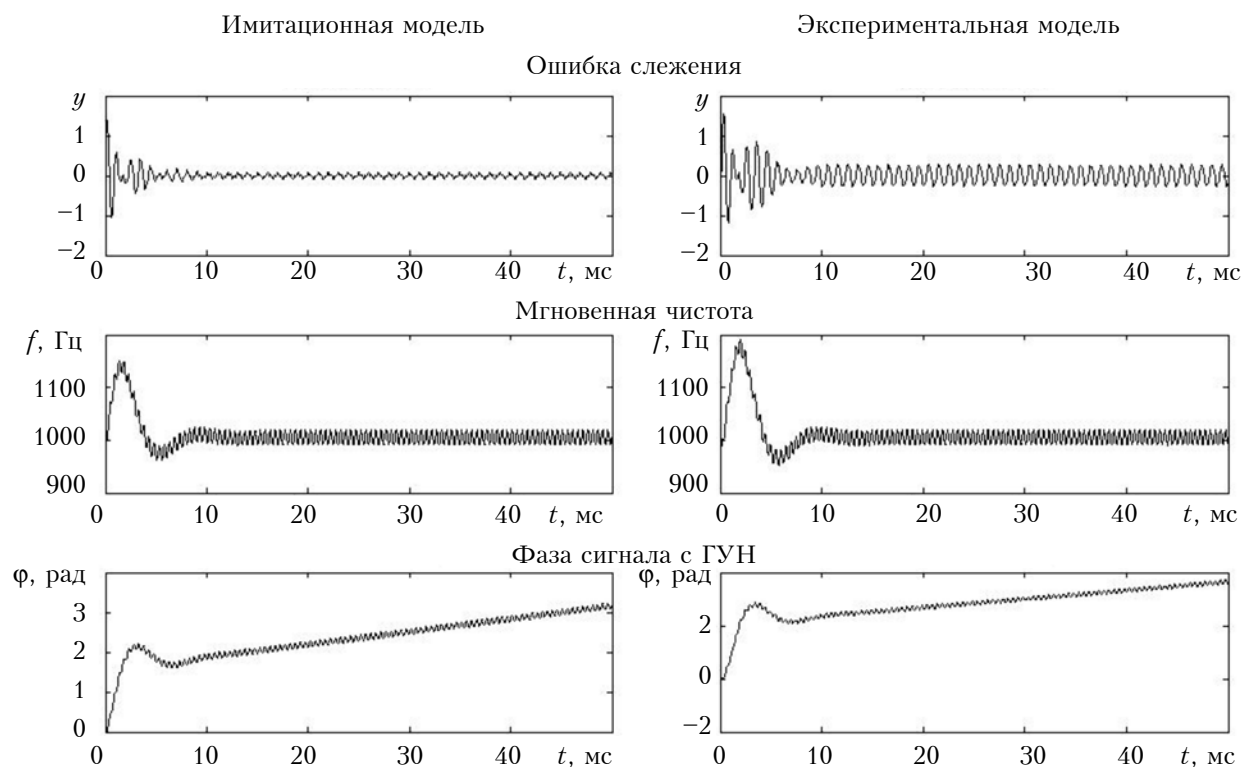


Рис. 7. Результаты исследования имитационной модели и экспериментального устройства при $\omega_{p2} = 2\pi \cdot 200$ рад/с, $\zeta_2 = 0,707$

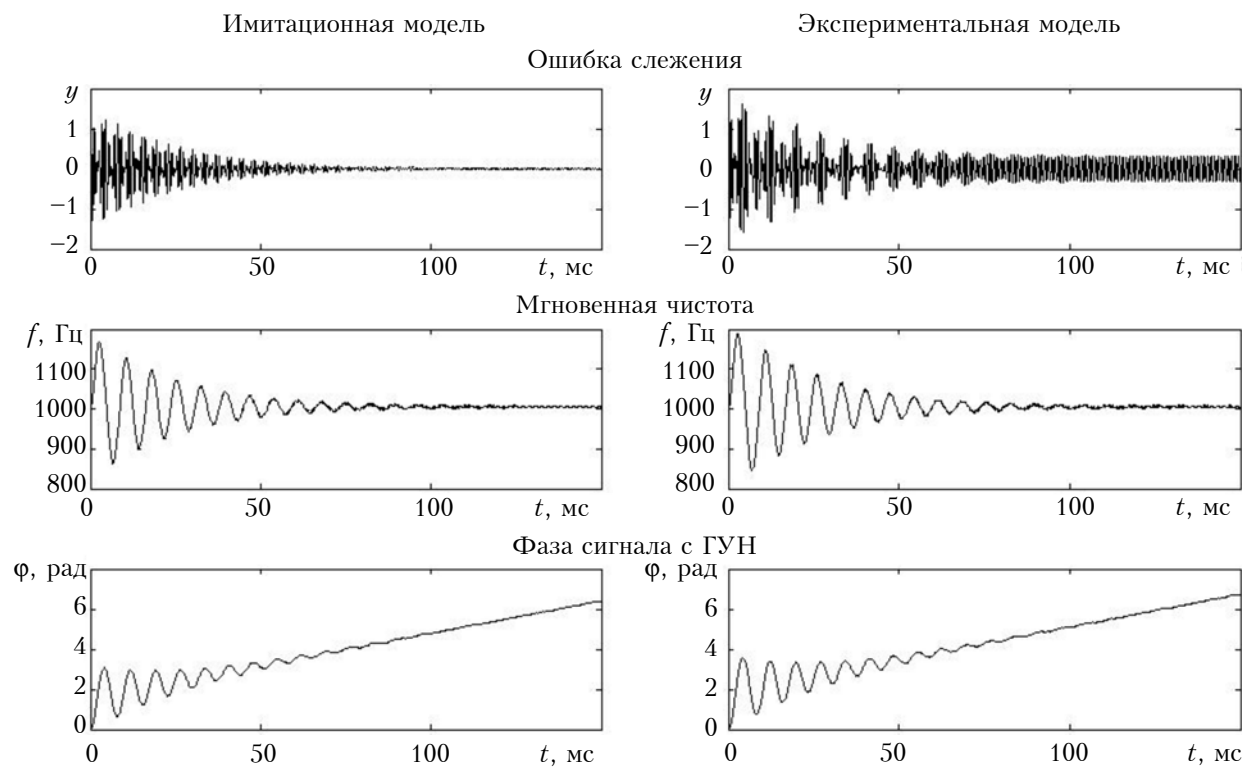


Рис. 8. Результаты исследования имитационной модели и экспериментального устройства при $\omega_{p3} = 2\pi \cdot 200$ рад/с, $\zeta_3 = 0,1$

Такие наборы параметров были выбраны из соображений наглядности демонстрации изменений расположения нуля и полюсов (рис. 5), а также характеристик переходных процессов в зависимости от параметров устройства.

Для этих же наборов параметров проведено исследование экспериментального устройства ЦФАПЧ. Процесс захвата частоты гармонического колебания был реализован при начальной частотной расстройке $\Delta f = 5$ Гц ($f_{\text{вх}} = 1005$ Гц).

На рис. 6–8 представлены графики ключевых сигналов устройства ЦФАПЧ, а также мгновенной частоты и фазы сигнала на выходе ГУН, полученные имитационным моделированием и экспериментально. Приведенный здесь сигнал $y(t)$ представляет собой разность между входным сигналом и выходным, сдвинутым по фазе на 90° (величина $y(t)$ представлена в нормализованной форме при амплитуде входного и выходного сигналов 1 В), его форма позволяет оценить время захвата частоты.

Как видно из рисунков, программно-аппаратная реализация устройства ЦФАПЧ дает результаты, достаточно близкие к результатам имитационного моделирования — разница их оценок време-

ни вхождения в синхронизм не превышает 10%. Приведенные графики демонстрируют влияние параметров ω_p и ζ на время установления синхронизма — их увеличение вызывает уменьшение продолжительности переходного процесса и наоборот. Время установления синхронизма для трех рассмотренных случаев составляет приблизительно 70, 7 и 80 мс соответственно.

Примерно такие же значения можно получить из рис. 9 (см. также первую страницу обложки), где изображены входной, выходной и разностный сигналы на экране осциллографа для тех же значений параметров устройства ЦФАПЧ, что подтверждает правильность полученных на компьютере данных.

Одной из особенностей результатов экспериментального моделирования является наличие пульсаций в сигнале $y(t)$, которые обусловлены в основном погрешностями квантования и дискретизации АЦП и ЦАП (из-за их ограниченной разрядности). Однако уровень этих пульсаций является недостаточным для того, чтобы привести к потере синхронизма.

Выводы

Результаты исследования показали, что программно-аппаратная реализация цифрового устройства фазовой автоподстройки частоты является полностью работоспособной и функциональной. Измеренное время вхождения в синхронизм экспериментального устройства не более чем на 10% отличается от рассчитанного.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для быстрого захвата частоты гармонического колебания следует увеличивать резонансную частоту и коэффициент затухания устройства.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение помехоустойчивости программно-аппаратного устройства ЦФАПЧ и влияния модуляции, шумов и детерминированных помех на его динамические характеристики.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Best R.E., Phase-locked loops: design, simulation, and applications (professional engineering). — New York: McGraw-Hill Companies Inc., 2003.
2. Silicon Laboratories “Introduction to FPGA-based ADPLLs” [Электронный ресурс] / <https://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/AN575.pdf>. — Rev. 0.1, 2011.
3. Цифровой контур ФАПЧ (digital PLL) и его свойства [Электронный ресурс] / www.dsplib.ru/content/dpll/dpll.html.
4. Полікарівських О.І. Аналіз методів перетворення фаза-амплітуда у цифрових обчислювальних синтезаторах // Вісник Хмельницького національного університету. — 2012. — № 6. — С. 226–232.
5. STMicroelectronics “Datasheet — production data STM32F405xx, STM32F407xx” [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://udel.edu/~furkan/cpeg423/13summer/stm32f4/DM00037051.pdf> — Rev 5, 2015.
6. Полікарівських О.І. Фазове коло як основа класифікації прямих синтезаторів частоти // Вісник Хмельницького національного університету. — 2014. — № 5. — С. 133–139.

Дата поступления рукописи
в редакцию 11.08 2016 г.

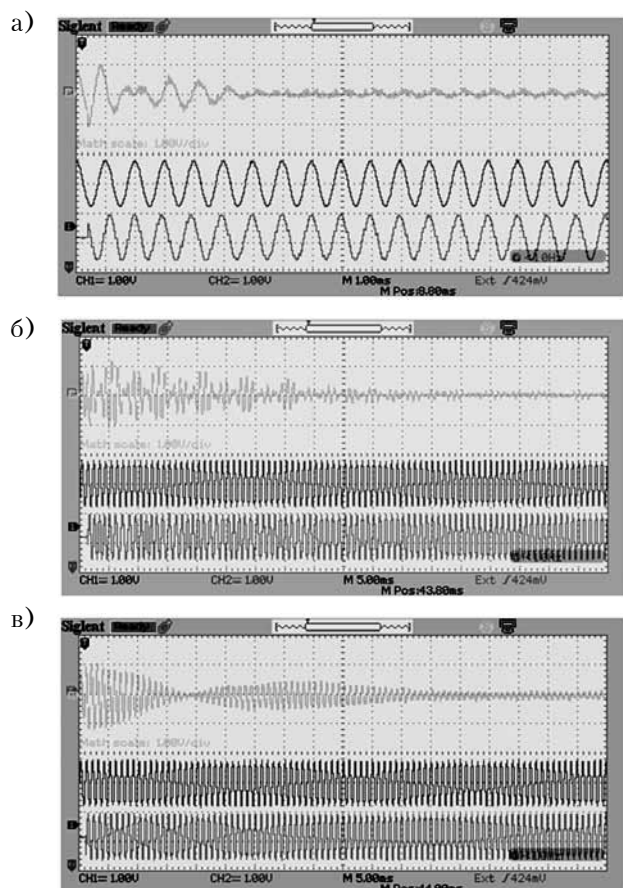


Рис. 9. Осциллограммы разностного, входного и выходного сигналов при различных значениях параметров ФАПЧ:

- а — $\omega_{p1} = 2\pi \cdot 20$ рад/с, $\zeta_1 = 0,707$;
 б — $\omega_{p2} = 2\pi \cdot 200$ рад/с, $\zeta_2 = 0,707$;
 в — $\omega_{p3} = 2\pi \cdot 200$ рад/с, $\zeta_3 = 0,1$

С. І. АЛТУНІН, А. П. БОНДАРЄВ

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: bondap@ukr.net, serg.alt.i@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРОГРАМНО-АПАРАТНОМУ ПРИСТРОЇ ЦИФРОВОГО ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ

Робота присвячена експериментальному дослідженню перехідних процесів, що виникають у цифровому пристрої фазового автоматичного підстроювання частоти (ЦФАПЧ) після замикання контуру зворотного зв'язку. З цією метою була проведена програмно-апаратна реалізація пристрою ЦФАПЧ. В статті наведено структурну схему пристрою ЦФАПЧ і описано його математичну модель. Розглянуто процес захоплення частоти гармонічного коливання та проаналізовано вплив основних параметрів пристрою ЦФАПЧ (власної частоти та коефіцієнта згасання) на тривалість перехідного процесу. Наведено графіки ключових сигналів пристрою ЦФАПЧ для оцінки тривалості перехідного процесу. Результати експериментального дослідження програмно-апаратного пристрою ЦФАПЧ співставлені з результатами дослідження його імітаційної моделі.

Ключові слова: програмно-апаратна реалізація, ЦФАПЧ, частотна та фазова похибка синхронізації, коефіцієнт згасання, власна частота, перехідний процес.

DOI: 10.15222/TKEA2016.4-5.15

UDC 621.372

S. I. ALTUNIN, A. P. BONDARIEV

Ukraine, Lviv Polytechnic National University

E-mail: bondap@ukr.net, serg.alt.i@gmail.com

EXPERIMENTAL RESEARCH OF TRANSIENT PROCESSES IN FIRMWARE DIGITAL PHASE-LOCKED LOOP

This article considers the experimental research of transient processes that occur in digital phase-locked loops (DPLL) after closing the feedback loop. Firmware implementation of DPLL device was made for this purpose.

The paper shows the block diagram of the DPLL and describes its mathematical model. In particular, the location of poles and zeros of DPLL transfer function was determined by the transfer function of the 2nd order analog PLL and the formulas for digital filter coefficients were deducted. The article also represents the block diagram of hardware part of the firmware DPLL. Its key part is the STM microcontroller which is connected to the PC. For convenience reasons, the unique interface between the microcontroller and the PC was created in order to present waveforms of several signals simultaneously. Moreover, the paper depicts the algorithm of software part of the firmware DPLL in general as well as the detailed algorithm of voltage-controlled oscillator (VCO) operation – it works as direct digital synthesizer (DDS).

The experimental research of the frequency acquisition process of harmonic oscillation was performed for three different sets of DPLL parameters. For each case the location of DPLL poles and zeros and plots of DPLL key signals (tracking error, current frequency and phase of output signal) were shown. Obtained diagrams demonstrate that a change of the DPLL natural frequency and damping factor influences on the transient process duration. Pictures signal waveforms from oscilloscope confirm these results. Furthermore, the results of the firmware DPLL research correspond to investigation results of existing simulation model of this DPLL with sufficient accuracy.

Keywords: firmware implementation, DPLL, frequency and phase synchronization error, damping factor, natural frequency, transient process.

REFERENCES

1. Best R.E. *Phase-locked loops: design, simulation, and applications (professional engineering)*. New York, McGraw-Hill Companies Inc., 2003
2. Silicon Laboratories "Introduction to FPGA-based ADPLLs" / <https://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/AN575.pdf>. Rev. 0.1, 2011.
3. [Digital PLL and its properties] www.dsplib.ru/content/dpll/dpll.html. (Rus)

4. Polikarovs'kikh O. I. [Analysis of methods of phase-amplitude transformation in digital computing synthesizers]. *Visnik Khmel'nits'kogo natsional'nogo universitetu*, 2012, no. 6, pp. 226 – 232.
5. *STM Microelectronics "Datasheet – production data STM32F405xx, STM32F407xx"* / <http://www.st.com/~/media/Products/Datasheets/STM32F405xx.pdf>. Rev 5, 2015.
6. Polikarovs'kikh O. I. [Phase circle as a basis for classification of direct frequency synthesizer]. *Visnik Khmel'nits'kogo natsional'nogo universitetu*, 2014, no. 5, pp. 133 – 139.

Д. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО, А. П. КАРЛАНГАЧ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: sasha7725@i.ua

НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ С ПОВЫШЕННЫМИ КОМПОНОВОЧНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Предложены решения построения несущих конструкций в части вставных блоков и блочных каркасов, позволяющие повысить компоновочные характеристики электронных модулей, секций и настольных приборов и увеличить их функциональную емкость без изменения структуры построения стандартных несущих конструкций. Показана эффективность разработанных предложений.

Ключевые слова: несущие конструкции, блочные каркасы, вставные блоки, электронные модули.

Развитие радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) во многом обязано совершенствованию и развитию электронных компонентов (ЭК), с одной стороны, и механических структур, которые во многих случаях представлены стандартными несущими конструкциями (НК), с другой стороны. До широкого внедрения микроэлектроники масса НК составляла приблизительно треть от общей массы изделия, а с его началом стала значительно возрастать и превысила две трети общей массы [1, с. 16]. При этом НК вообще, а в первую очередь стандартные НК, в силу своих особенностей и высокой стоимости разработки и подготовки производства создаются на многие годы, а значит, должны удовлетворять требованиям РЭА не только на момент создания НК, но и в некоторой перспективе.

Таким образом, постоянно существует проблема сдерживания избыточности массы НК по отношению к массе ЭК. Однако масса является выражением прочности конструкции, обеспечение которой является не менее важной задачей.

Эти проблемы могут решаться разными путями, основные из которых следующие:

- создание новых НК, учитывающих развитие ЭК;

- повышение компоновочных характеристик НК без существенного их изменения, т. е. путем модификации и совершенствования.

Первый путь радикален и, конечно же, необходим, но он требует больших материальных и временных затрат и зачастую не может быть использован. Более гибким является второй путь. Им пользуются производители НК, разработчики РЭА в процессе достаточно длительного использования НК. И очень часто такие изменения НК выражаются в появлении новых стандартов. Так, необходимость в увеличении количества контактов на выходных соединителях

электронных модулей первого уровня привела к появлению новых электрических соединителей с увеличенным количеством контактов за счет уменьшения шага расположения контактов с 2,5 до 2 мм и увеличением возможного количества рядов контактов. В результате созданы стандарты на соединители [2, 3] и несущие конструкции блочных каркасов и вставных блоков [4].

Однако, несмотря на постоянное развитие стандартных НК, до сих пор остались без внимания два вопроса:

- использование соединителей для монтажа на поверхность;

- применение печатных плат меньших, чем это предусмотрено стандартами, размеров (для повышения их коэффициента заполнения в условиях использования функционально-узловых метода конструирования).

Целью настоящей работы было исследование несущих конструкций модулей первого уровня (вставных блоков) и модулей второго уровня (блочных каркасов) для повышения компоновочных характеристик, разработка предложений по использованию соединителей для поверхностного монтажа, а также применение печатных плат меньших размеров без изменения структуры построения НК для повышения компоновочных характеристик.

Улучшение характеристик РЭА, комплектуемой в настольных корпусах и секциях

Существует немало конструктивных решений по проектированию РЭА на основе НК, однако со временем их становится недостаточно в связи с интенсивным развитием радиоэлектронных средств. Так, например, создано много модификаций разъемной конструкции [5, с. 7; 6], которая предусматривает возможность установки электронных модулей с двух сторон — фронт-

тальной и тыльной. При этом модули устанавливаются в электрические соединители с задней стороны, являющиеся продолжением соединителей, установленных с фронтальной стороны кросс-платы. Они жестко закреплены, что создает определенные ограничения на размещение электронных модулей с задней стороны РЭА.

В связи с этим можно выделить такие недостатки:

- количество вставных блоков с задней стороны не может быть больше, чем с фронтальной;
- фронтальные и задние соединители образованы одними и теми же контактами, т. е. фронтальный и задний вставные блоки электрически жестко связаны между собой. Это хорошо для увеличения площади печатной платы при функционально-узловом методе конструирования, но плохо, если фронтальный и задний вставные блоки должны быть электрически не связанными.

Принимая во внимание эти недостатки, а с другой стороны, те возможности, которые можно развить при создании настольных приборов и секций шкафов и стоек, предлагается конструкция блочного каркаса с использованием для межблочных соединений кросс-плат и электрических соединителей для поверхностного монтажа [7]. Применение таких электрических соединителей позволяет обеспечить более эффективное использование площади кросс-платы, исключить жесткую привязку электрических соединителей с двух сторон кросс-платы друг к другу, уменьшить длину связей между электронными модулями, расположенными по обе стороны кросс-платы, и таким образом уменьшить влияние паразитных связей.

Кросс-плата с использованием электрических соединителей для поверхностного монтажа позволяет увеличить количество независимых электронных модулей в зависимости от их ширины и, соответственно, увеличить функциональную емкость проектируемого настольного прибора или секции.

Конструкция секции на основе такого блочного каркаса представлена на **рис. 1**. Она состоит

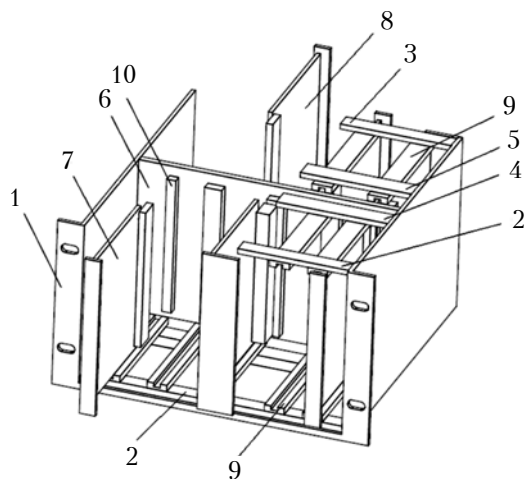


Рис. 1. Конструкция секции на основе блочного каркаса

из собственно блочного каркаса, вставных блоков и кросс-платы, выполняющей роль элемента межблочных электрических соединений.

Боковые стенки 1 механически соединены посредством восьми поперечных реек, которые расположены снизу и сверху спереди 2, сзади 3 и по обеим сторонам 4, 5 кросс-платы 6. Кросс-плата разделяет объем созданного таким образом блочного каркаса на две части, предназначенные для установки вставных блоков с фронтальной стороны 7 и сзади 8. Положение кросс-платы по глубине блочного каркаса определяется стандартными размерами печатных плат, которые в общем случае могут быть разными.

Между верхними и нижними парами поперечных реек, т. е. сверху и снизу кросс-платы, закрепляются направляющие 9, служащие для установки вставных блоков.

Блочный каркас предназначен для образования электронных модулей второго уровня типа настольных приборов — функционально законченных радиоэлектронных аппаратов, и секций — составных частей шкафов и стоек. И в первом, и во втором случае он комплектуется вставными блоками, электрическое соединение которых с кросс-платой осуществляется с помощью разъемных соединений — электрических соединителей.

Особенностью предлагаемой конструкции является использование электрических соединителей 10 для поверхностного монтажа на кросс-плате, благодаря чему реализуется совершенно независимая установка вставных блоков с обеих сторон кросс-платы в отличие от [2, 3]. Расположение соединителей определяется электрической принципиальной схемой, элементной базой и компоновкой РЭА.

Проведем количественную оценку компоновки секции. В качестве показателя компоновки будем использовать коэффициент, который характеризует выигрыш при использовании секции предложенной конструкции по сравнению со стандартным блочным каркасом:

$$K = n_1/n_2, \quad (1)$$

где n_1 — максимально возможное количество вставных блоков, устанавливаемых в секции предложенной конструкции;

n_2 — максимальное количество вставных блоков, которое можно установить в стандартном блочном каркасе.

При проведении расчетов приняты следующие допущения:

- коэффициент K рассчитывается только для одинаковых типоразмеров (по ширине) вставных блоков, устанавливаемых с фронтальной стороны;

— рассматривается ограниченное количество типоразмеров вставных блоков с шириной передней панели 15,24 мм (3НР); 20,32 мм (4НР); 25,4 мм (5НР); 30,48 мм (6НР); 35,56 мм (7НР); 40,64 мм (8НР); 45,72 мм (9НР); 50,8 мм (10НР), где НР — шаг приращения в стандарте МЭК 60297, равный 5,08 мм. Ограничение количества типоразмеров упрощает расчеты и в то

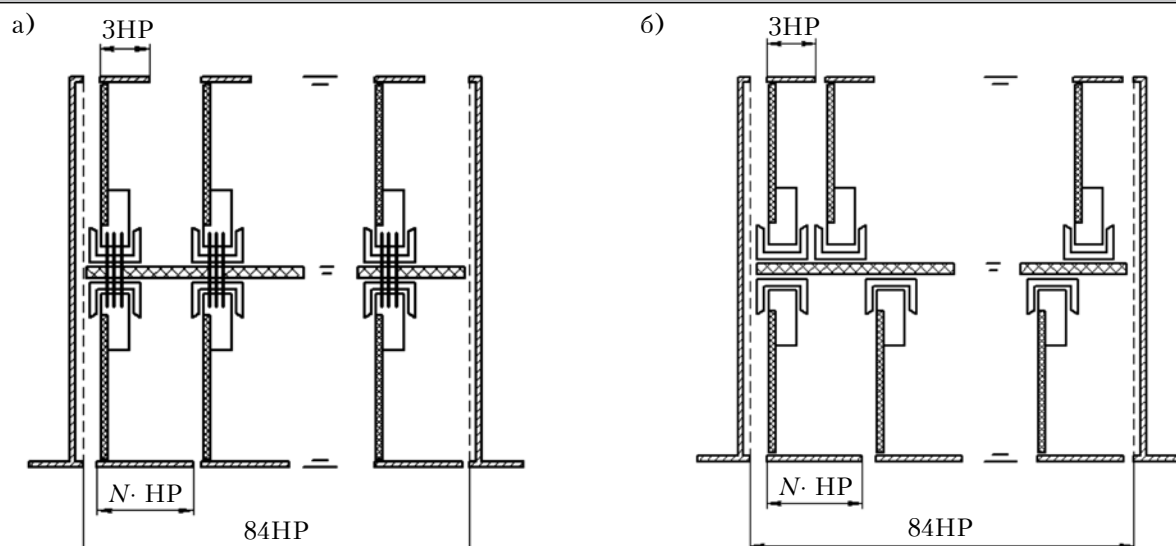


Рис. 2. Компоновка блочных каркасов (а) и секций (б) вставными блоками (N — количество шагов приращения)

же время существенно не влияет на результаты, т. к. позволяет выявлять тенденцию изменения показателей компоновки для основных, наиболее часто используемых типоразмеров;

- компоновочная ширина блочного каркаса и секции составляет 426,72 мм (84HP);

- рассматриваются случаи максимального заполнения блочного каркаса и секции вставными блоками;

- в стандартном блочном каркасе количество вставных блоков, устанавливаемых с задней стороны, зависит от количества вставных блоков, устанавливаемых с фронтальной стороны, и всегда равно им (по указанной выше причине наличия общих электрических соединителей);

- конструкция секции предполагает размещение на обеих сторонах кросс-платы независимых электрических соединителей для поверхностного монтажа.

Очевидно, что весьма затруднительно провести анализ всех вариантов компоновки, определяемых разным количеством вставных блоков с различной их шириной по лицевой панели. Поэтому рассмотрим два наиболее характерных варианта компоновки блочного каркаса и секции вставными блоками.

Вариант 1. С фронтальной стороны устанавливаются вставные блоки разной ширины — от 3HP до 10HP, с тыльной — только шириной 3HP. При этом в стандартном блочном каркасе с фронтальной и задней сторон расположено одинаковое количество вставных блоков, независимо от ширины фронтальных (рис. 2, а); в секции возможна установка большего количества вставных блоков с задней стороны по сравнению с фронтальной (рис. 2, б).

Вариант 2. Отличается от варианта 1 только тем, что в секции с задней стороны устанавливаются вставные блоки и шириной 3HP, и шириной, которая соответствует ширине встав-

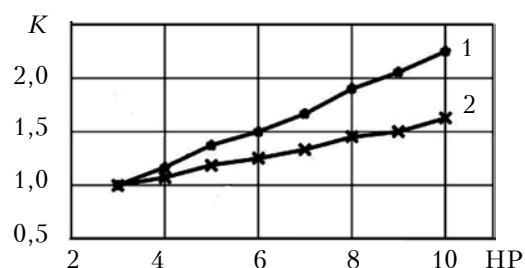


Рис. 3. Зависимость выигрыша в компоновке секций от размеров вставных блоков по ширине для первого (1) и второго (2) вариантов компоновки

ных блоков с фронтальной стороны. При этом принято, что количество одних и других блоков одинаково.

На рис. 3 приведены результаты расчета коэффициента K для двух этих вариантов. Здесь видно, что независимая компоновка вставных блоков с двух сторон в секции позволяет до 2,25 раз увеличить их количество по сравнению с фиксированной компоновкой блочных каркасов, что является хорошим результатом.

Улучшение компоновочных характеристик вставных блоков

С развитием элементной базы объективно уменьшается коэффициент заполнения печатных узлов и связано это, в первую очередь, с уменьшением размеров ЭК и увеличением уровня интеграции микросхем. По этой причине при длительном использовании стандартных НК размер печатных плат (ПП) перестает удовлетворять требованиям разработчиков и производителей РЭА в отношении эффективного использования их площади при применении функционально-узлового метода конструирования.

В качестве компенсации этого результата можно на одной ПП располагать два и более

функционально-законченных узла, но это не всегда возможно и удобно, в первую очередь, с позиции унификации печатных узлов (модулей). Вводить же ПП новых типоразмеров в стандартную НК без существенной доработки последней невозможно. При этом возникает негативный побочный эффект — значительное увеличение количества типоразмеров деталей и сборочных единиц отрицательно сказывается на показателях технологичности.

В связи с этим предлагается конструкция вставного блока — электронного модуля первого уровня, в котором при необходимости вместо одной ПП можно использовать две и более ПП меньших размеров без изменения структуры построения НК (рис. 4).

Электронный модуль предназначен для размещения электронных компонентов и соединения печатных узлов между собой. Его целесообразно использовать для РЭА, которая размещается в стандартных НК, поскольку это не требует увеличения типоразмеров модулей всех уровней при одновременном улучшении компоновочных характеристик аппаратуры.

В представленном на рис. 4 варианте печатные платы 3 механически закреплены на несущей рамке 1 с элементами крепления, на которой также крепится передняя панель 2 с внешними установочными элементами. На крайней ПП расположены один или несколько электрических соединителей 4 врубного типа, предназначенные для внешнего соединения электронного модуля. ПП электрически соединяются между собой при помощи гибкого печатного кабеля 5, а для соединения печатных плат с внешними установочными элементами использован ленточный провод 6.

Размеры несущей рамки соответствуют размерам стандартных ПП, а ее форма в поперечном сечении позволяет устанавливать ПП без смещения в горизонтальном направлении и, соответственно, не нарушая сочленение электрических соединителей врубного типа в конструктивах следующего уровня.

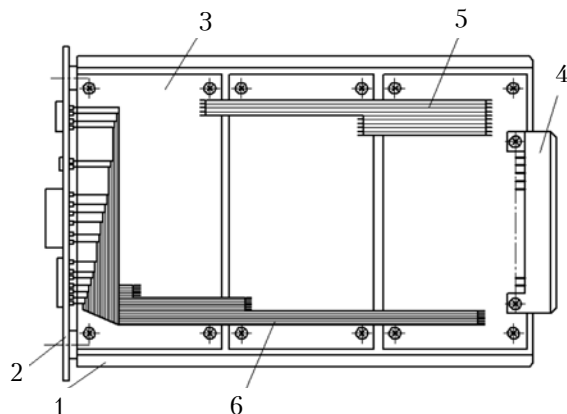


Рис. 4. Конструкция электронного модуля с тремя ПП, взаимозаменяемого со стандартными вставными блоками

Использование передней панели, электрических соединителей врубного типа и рамки с элементами крепления для разных размеров ПП позволяет размещать две и более ПП в зависимости от функционального назначения электронного модуля, использовать разные конструкции электрических соединений между печатными платами, между ПП и электронными компонентами на передней панели, между ПП и выходными электрическими соединителями.

Применение такой конструкции электронного модуля, когда при необходимости можно на место одной ПП установить несколько ПП меньшего размера с более плотной компоновкой, позволит в перспективе повышать функциональную емкость электронного модуля. Для количественной оценки выигрыша, который можно получить при этом, необходимо определить изменение коэффициента заполнения ПП (K_3) с развитием РЭА. Очевидно, что получить точную зависимость на сравнительно продолжительный период времени практически невозможно в связи с действием многих факторов, влияющих на изменение K_3 . В первую очередь, это многообразие типов функциональных модулей, а значит, и применяемых наборов электронных компонентов, существенно различающихся по габаритным и компоновочным показателям. Однако для выявления тенденции изменения K_3 со временем и демонстрации выигрыша, который дает предлагаемый подход, представим коэффициент заполнения ПП в виде полинома n -й степени

$$y(t) = a + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + \dots + b_nt^n, \quad (2)$$

где $y(t)$ выражает зависимость K_3 от времени t .

Графическое изображение этой модели представлено на рис. 5.

Продemonстрируем на примере, какой выигрыш можно получить при использовании предложенного подхода. Для этого примем следующие допущения.

1. На ПП каждого типоразмера размещается один функциональный узел.

2. С точки зрения унификации и удобства компоновки электронных модулей целесообразно использовать кратные размеры и, соответственно, площади ПП, а именно S/n , где S — площадь исходной ПП; n — целое число. Тогда ряд значений площади ПП можно при необходимости представить как $S, S/2, S/3, S/4$ и т. д.

3. В исходном состоянии допустимый коэффициент заполнения ПП принимаем равным 0,8.

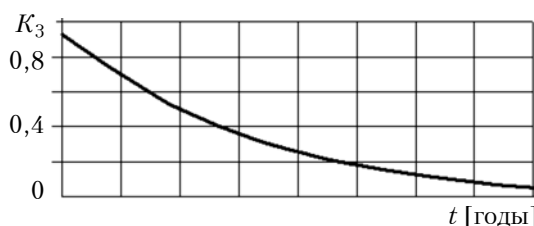


Рис. 5. Тенденция изменения коэффициента заполнения ПП с развитием РЭА

Переход на ПП $S/2$ возможен в том случае, когда K_3 снизится до 0,4, т. е. когда суммарная установочная площадь электронных компонентов уменьшится в 2 раза и станет возможным применение двух плат вместо одной.

Переход от исходной платы на типоразмер $S/3$ (т. е. на три ПП) возможен при уменьшении коэффициента заполнения в 3 раза: $K_3 = 0,8/3 = 0,27$; переход от конструкции с двумя ПП — при уменьшении K_3 на треть: $K_3 = 0,8 \cdot 2/3 = 0,53$.

Переход от исходной платы на типоразмер $S/4$ (т. е. на четыре ПП) возможен при уменьшении коэффициента заполнения в 4 раза: $K_3 = 0,8/4 = 0,2$; переход от конструкции с тремя ПП — при уменьшении K_3 на четверть: $K_3 = 0,8 \cdot 3/4 = 0,6$.

Аналогично можно представить условия перехода на другие типоразмеры ПП.

Если в соответствии с представленными условиями изменять конструкцию электронного модуля в части изменения количества ПП, соответственно уменьшая их площадь, то зависимость коэффициента заполнения от времени, представленная на рис. 5, примет такой вид, как показано на **рис. 6**.

В электронном модуле, конструкция которого позволяет при наступлении соответствующих условий устанавливать две, три и более ПП вместо одной, увеличение коэффициента заполнения ПП происходит скачкообразно и составляет, соответственно, два, три и более раз. При этом выигрыш можно представить также увеличением функциональной емкости электронного модуля, соответственно, в два, три и более раз. Этот выигрыш — максимальный в принятых условиях, т. е. при требовании достижения максимального значения $K_3 = 0,8$ и обеспечения своевремен-

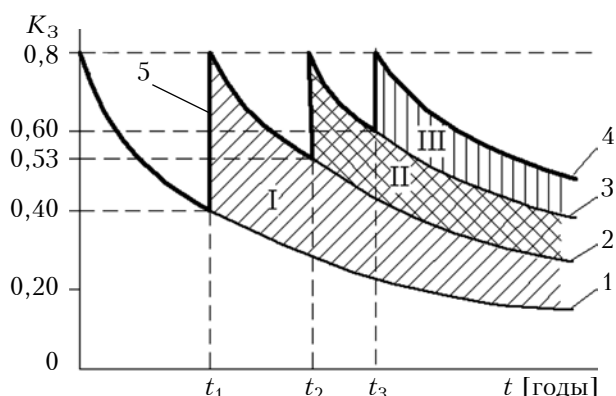


Рис. 6. Корректировка тенденции изменения коэффициента заполнения ПП с развитием РЭА путем использования конструкции электронного модуля с двумя (2), тремя (3) и четырьмя (4) ПП вместо одной (1):

1 — 4 — статистические кривые снижения коэффициента заполнения печатных плат; 5 — кривая, иллюстрирующая зависимость K_3 при своевременном переходе на меньшие размеры ПП; t_1, t_2, t_3 — моменты перехода, соответственно, на две, три и четыре ПП

ного перехода на соответствующее количество ПП в электронном модуле.

На рис. 6 получаемый с течением времени выигрыш от перехода к двум печатным платам вместо одной, к трем вместо двух и к четырем вместо трех отражается площадью заштрихованных зон, соответственно, I, II и III.

Выводы

В результате исследования несущих конструкций вставных блоков и блочных каркасов с целью повышения их компоновочных характеристик разработаны следующие конструктивные решения:

1. Конструкция вставных блоков, предусматривающая вместо одной две и более печатных плат меньших размеров, что позволяет компенсировать уменьшение коэффициента заполнения плат в перспективе и повысить функциональную емкость электронных модулей.

2. Конструкция блочного каркаса с двусторонним расположением вставных блоков и организацией электрических соединений с помощью кросс-платы, в которой используются электрические соединители для поверхностного монтажа, что позволяет выполнять независимую установку вставных блоков по обе стороны кросс-платы и создавать условия для увеличения количества вставных блоков.

При этом важным является то, что предложенные решения не приводят к изменению структуры построения стандартных несущих конструкций и ухудшению других ее показателей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шимкович А. А. Конструирование несущих конструкций РЭС и защита их от дестабилизирующих факторов. Учебное пособие. — Минск: БГУИР, 1999.
2. МЭК 61076-4-101:2001. Разъемы для электронного оборудования. Часть 4-101. Разъемы установленного качества для печатных плат. Частный стандарт на модули разъемов, состоящих из двух частей, с координатной сеткой шагом 2,0 мм для печатных и объединительных плат в соответствии с МЭК 60917.
3. МЭК 61076-4-113:2002. Соединители для электронной аппаратуры. Соединители для печатных плат. Часть 4-113. Частные технические условия на соединители, состоящие из двух частей, имеющие 5 рядов и координатную сетку 2,54 мм, применяемые для печатных плат и задних панелей шин.
4. МЭК 60297-3-104-2006. Механические конструкции для электронного оборудования. Размеры механических конструкций серии 482,6 мм (19 дюймов). Часть 3-104: Размеры блочных каркасов и вставных блоков, зависящие от серии применяемых разъемов.
5. ГОСТ Р МЭК 60297-3-101-2006. Конструкции несущие базовые радиоэлектронных средств. Блочные каркасы и связанные с ними вставные блоки. Размеры конструкций серии 482,6 мм (19 дюймов).
6. МЭК 60297-3-101:2004. Механические конструкции для электронного оборудования. Размеры механических конструкций серии 482,6 мм (19 дюймов) Часть 3-101. Блочные каркасы и связанные с ними вставные блоки.
7. Пат. 110872 України. Радиоэлектронный блок / А. А. Єфіменко, О. П. Карлангач, С. М. Лазарев. — 2016. — Бюл. № 4.

Дата поступления рукописи
в редакцию 14.09 2016 г.

НЕСУЧІ КОНСТРУКЦІЇ З ПІДВИЩЕНИМИ КОМПОНУВАЛЬНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Запропоновано рішення побудови несучих конструкцій у частині вставних блоків і блочних каркасів, що дозволяють підвищувати компоновальні характеристики електронних модулів, секцій і настільних приладів і підвищити їх функціональну ємність без зміни структури побудови стандартних несучих конструкцій. Показана ефективність розроблених рішень.

Ключові слова: несучі конструкції, блочні каркаси, вставні блоки, електронні модулі.

DOI: 10.15222/ТКЕА2015.4-5.23

UDC 621.3.396.6

YEFIMENKO A. A., KARLANGACH A. P.

Ukraine, Odessa National Polytechnic University

E-mail: sasha7725@i.ua

MECHANICAL STRUCTURES WITH ENHANCED LAYOUT CHARACTERISTICS

The authors propose solutions for constructing mechanical structures for electronic equipment in terms of plug-in units and subracks, allowing to increase the layout characteristics of electronic modules, sections and desktop devices and increase their functional capacity without changing the architecture of standard mechanical structures. The paper shows effectiveness of the developed solutions. There is a problem of restraining of mass redundancy of mechanical structures for electronic equipment in relation to the weight of the electronic components. On the other hand, the weight is an indicator of structural strength, providing of which is not less important problem.

These problems can be solved in different ways, the main of which are the following: a) development of new mechanical structures for electronic equipment taking into account the development of the electronic components; b) improving layout characteristics of mechanical structures for electronic equipment without significant changes in their architecture.

The aim of the study was to research mechanical structures of the first level (plug-in units and modules of the second level) of subracks to improve layout characteristics, and to develop methods for the use of connections for surface mounting and for the use of printed circuit boards of smaller dimensions without changing the architecture of the mechanical structures in order to improve layout characteristics.

The research allowed the authors to develop the following solutions:

- 1. The design of plug-in units in which instead of one printed circuit board (PCB) may be two, three or more PCBs of smaller dimensions to compensate a decrease in PCB fill factor in time and to increase the functional capacity of electronic modules.*
- 2. Construction of block designs with a bilateral arrangement of plug-in units and the organization of the electrical connections by way of backplanes with electrical connectors for surface mounting, which allows performing independent installation of plug-in units on both sides of the backplane and creates conditions for increasing the number of plug-in units.*

The proposed solutions do not lead to a change in the architecture of standard mechanical structures for electronic equipment or any performance degradation.

Key words: standard mechanical structure, subrack, plug-in unit, electronic module.

REFERENCES

1. Shimkovich A. A. *Konstruirovaniye nesushchikh konstruktsiy RES i zashchita ikh ot destabiliziruyushchih faktorov* [Design of Mechanical structures for electronic equipment and their protection from the destabilizing factors]. Minsk, BSUIR, 1999, 214 p. (Rus)
2. IEC 61076-4-101:2001. Connectors for electronic equipment. Part 4-101: Printed board connectors with assessed quality. Detail specification for two-part connector modules, having a basic grid of 2,0 mm for printed boards and backplanes in accordance with IEC 60917.
3. IEC 61076-4-113:2002. Connectors for electronic equipment - Printed board connectors - Part 4-113: Detail specification for two-part connectors having 5 rows with a grid of 2,54 mm for printed boards and backplanes in bus applications.
4. IEC 60297-3-104:2006. Mechanical structures for electronic equipment - Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series - Part 3-104: Connector dependent interface dimensions of subracks and plug-in units.
5. State Standard R MEK 60297-3-101-2006. [Mechanical structures for radio-electronic equipment. Subracks and associated plug-in units. Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series], 2006 (Rus)
6. IEC 60297-3-101:2004. Mechanical structures for electronic equipment - Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series — Part 3-101: Subracks and associated plug-in units.
7. Yefimenko A. A., Karlangach O. P., Lazarev S. M. *Radioelektronnyy blok* [Radioelectronic unit]. Patent Ukraine, no 110872, Bul. 4, 2016 (Ukr)

Г. П. ПАРХОМЕНКО, д. ф.-м. н. П. Д. МАРЬЯНЧУК

Украина, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

E-mail: h.parkhomenko@chnu.edu.ua

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР NiO/*p*-CdTe и NiO/*n*-CdTe

*Изготовлены гетероструктуры NiO/*n*-CdTe и NiO/*p*-CdTe методом реактивного магнетронного напыления тонких пленок оксида никеля на подложки из кристаллов CdTe *p*- и *n*-типа проводимости, исследованы их темновая и световая вольт-амперные характеристики. Установлено, что основными механизмами токопереноса при прямом смещении является генерационно-рекомбинационный и туннелирование, при обратных смещениях — туннелирование.*

Ключевые слова: гетероструктура, тонкая пленка, механизмы токопереноса, NiO, CdTe.

В настоящее время проводится интенсивный поиск и исследование различных перспективных материалов и структур на их основе для применения в высокоэффективных электронных приборах, сенсорах и солнечных элементах. Использование гетероструктур для изготовления приборов полупроводниковой электроники и фотовольтаики расширяет их функциональные возможности и повышает эксплуатационные характеристики по сравнению с фотоэлектрическими приборами на основе гомопереходов. В то же время значительный интерес представляет создание гетеропереходов, в которых в качестве окна используются широкозонные прозрачные оксиды металлов. Это позволяет расширить область их применения и уменьшить расходы на изготовление таких приборов, поскольку технологии изготовления тонкопленочных полупроводников менее затратны, чем объемных.

Одним из перспективных материалов среди прозрачных токопроводящих оксидов является оксид никеля. Использование реактивного магнетронного метода напыления позволяет изменять параметры тонких пленок NiO в широких пределах. Благодаря своим физическим свойствам тонкие пленки NiO широко используются для изготовления различных фотоэлектрических устройств: прозрачные слои (окна) для солнечных элементов, антиотражающие покрытия, газовые сенсоры [1, 2]. В свою очередь перспективным полупроводниковым материалом является CdTe, который имеет выгодную для практического использования совокупность физико-химических параметров (высокий коэффициент поглощения, низкий показатель преломления, небольшая концентрация собственных носителей заряда, хорошие механические и тепловые характеристики) [3]. В настоящее время в научной литературе практически отсутствуют

работы, посвященные детальному изучению гетероструктур на основе NiO и CdTe.

В настоящей работе исследованы гетероструктуры NiO/*p*-CdTe и NiO/*n*-CdTe, их темновая и световая вольт-амперные характеристики, а также установлены основные механизмы токопереноса в них.

Методика проведения эксперимента

Для изготовления структур NiO/*p*-CdTe и NiO/*n*-CdTe использовали кристаллы CdTe *p*- и *n*-типа проводимости, выращенные методом Бриджмена.

Нанесение пленок NiO проводилось на свежеотполированные подложки CdTe (типоразмером 5×5×1 мм) в универсальной вакуумной установке Leybold-Heraeus L560 с помощью реактивного магнетронного распыления мишени чистого никеля в атмосфере смеси аргона и кислорода при постоянном напряжении.

Подложки размещались над магнетроном, а для получения однородных по толщине пленок обеспечивалось вращение столика. Перед началом процесса напыления вакуумная камера откачивалась до остаточного давления 5·10⁻⁵ мбар.

Для напыления пленок NiO никелевая мишень (шайба диаметром 100 мм и толщиной 1 мм) чистотой 99,99% размещалась на столике магнетрона с водяным охлаждением на расстоянии 7 см от подложек.

Проводилось кратковременное протравливание бомбардирующими ионами аргона поверхности мишени и подложки для удаления неконтролируемых загрязнений.

С целью повышения гибкости технологических режимов нанесения пленок созданы условия для формирования газовой смеси аргона и кислорода в произвольной пропорции из двух независимых источников непосредственно во время проведения технологического процесса.

Для установления и регулирования давления газа в вакуумной системе чистый аргон подается из баллона в вакуумную камеру через регулятор давления. Регулирование результирующего давления осуществляется с помощью магнитного клапана контроля давления с обратной связью. После установки заданного давления аргона магнитный клапан перекрывается, и в камеру через клапан натекания запускается кислород.

В процессе напыления парциальное давление аргона в вакуумной камере составляло примерно $3,4 \cdot 10^{-3}$ мбар, кислорода — $2,4 \cdot 10^{-4}$ мбар. Установленная мощность магнетрона — около 120 Вт. Процесс напыления длился 10 мин при температуре подложек 373 К.

Фронтальный электрический контакт к тонким пленкам NiO формировался с помощью реактивного магнетронного распыления никеля при температуре подложки 373 К. Тыловой электрический контакт к подложкам CdTe формировался осаждением меди путем восстановления из водного раствора медного купороса с последующим термическим осаждением индия.

Толщина пленок NiO измерялась с помощью интерферометра МИИ-4 по стандартной методике, она составляла 280 нм.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетероструктур измеряли при комнатной температуре по стандартной методике с использованием источника постоянного тока BVP Electronics, в качестве амперметра использовался точный мультиметр Fluke 5545A, вольтметра — Picotest M3500A.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены вольт-амперные характеристики гетеропереходов NiO/*n*-CdTe и NiO/*p*-CdTe, при использовании которых были получены основные параметры гетеропереходов: коэффициент выпрямления гетеропереходов k , значение высоты потенциального барьера ϕ_0 и значение последовательного сопротивления данных гетеропереходов R_S (табл. 1).

Для удобства анализа механизмов токопереноса через гетеропереходы NiO/*n*-CdTe и NiO/*p*-CdTe с целью установления доминирующих прямых ветвей ВАХ были построены в полулогарифмическом масштабе. Как видно из рис. 2, графики зависимости $\ln I = f(V)$ обоих гетеропереходов состоят из двух прямолинейных участков, что свидетельствует об экс-

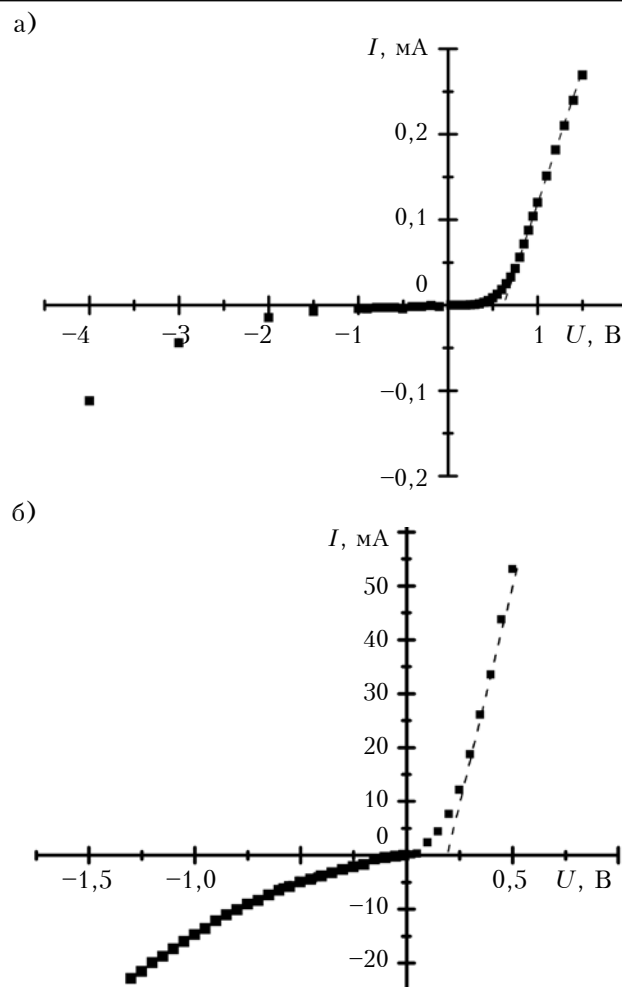


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики гетеропереходов NiO/*n*-CdTe (а) и NiO/*p*-CdTe (б)

поненциальной зависимости тока от напряжения и, соответственно, о наличии двух доминирующих механизмов переноса заряда в исследуемом интервале напряжений. Из выражения $\ln(I)/\Delta U = e/(nkT)$ были получены значения коэффициента неидеальности n для обоих участков напряжений структур, приведенные в табл. 2.

При малых напряжениях в обоих случаях $n \approx 2$, что позволяет предположить, что основной механизм токопереноса в исследуемых гетероструктурах определяется генерационно-рекомбинационными процессами в области про-

Таблица 1

Параметры гетеропереходов NiO/*n*-CdTe и NiO/*p*-CdTe

Гетеропереход	k	ϕ_0 , эВ	R_S , Ом
NiO/ <i>n</i> -CdTe	$1,7 \cdot 10^5$ (при $U=1$ В)	0,66	1880
NiO/ <i>p</i> -CdTe	10 (при $U=0,5$ В)	0,2	5,5

Таблица 2

Примерные значения коэффициента неидеальности гетеропереходов NiO/*n*-CdTe и NiO/*p*-CdTe

Гетеропереход	U , В	n
NiO/ <i>n</i> -CdTe	$0 < U < 0,5$	2
	$0,5 < U < 1,2$	10
NiO/ <i>p</i> -CdTe	$0 < U < 0,15$	2
	$0,15 < U < 0,5$	6

пространственного заряда, а ток описывается выражением Саа – Нойса – Шокли [4, 5]

$$I_{gr} = I_{gr}^0 \left(\exp \frac{eU}{nkT} - 1 \right), \quad (1)$$

где I_{gr}^0 – генерационно-рекомбинационный ток отсечки при $U = 0$.

Большие значения показателя неидеальности ($n \approx 10$ при $U > 0,5$ для $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$ и $n \approx 6$ при $U > 0,15$ для $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$) можно рассматривать как свидетельство туннельной природы механизма токопереноса. Прямолинейные участки ВАХ начинаются при достаточно больших смещениях, при которых область пространственного заряда достаточно тонкая для прямого туннелирования, которое описывается формулой Ньюмена для туннельного механизма токопереноса [6]

$$I = I_t \exp[\alpha(U)], \quad (2)$$

где I_t – ток отсечки, $I_t = I_t^0 \exp(\gamma T)$;
 α, γ – коэффициенты.

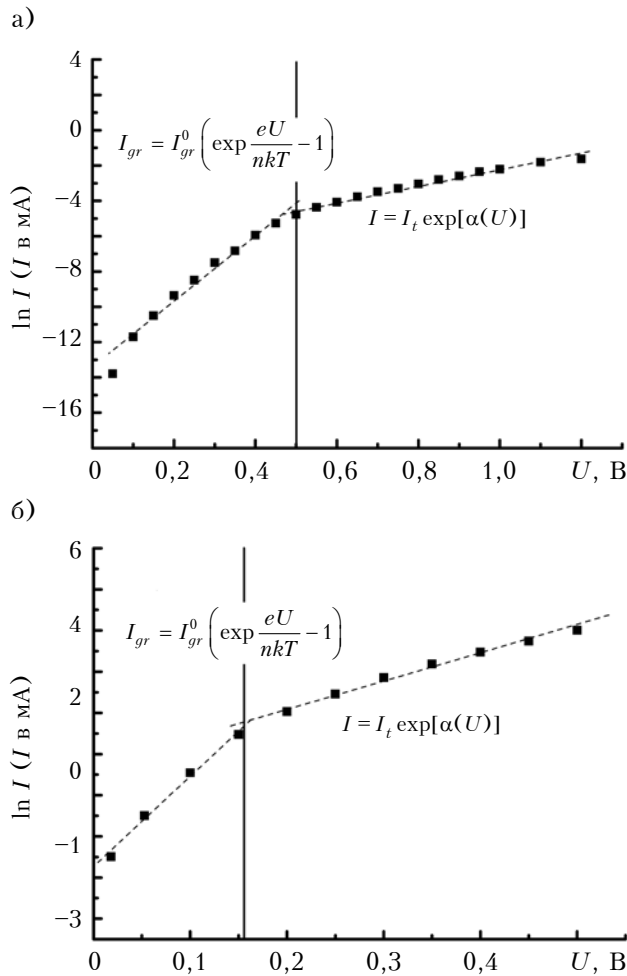


Рис. 2. Прямые ветви ВАХ в полулогарифмическом масштабе для гетероструктур $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$ (а) и $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$ (б)

Из выражения (2) видно, что наклон прямолинейных участков ВАХ позволяет определить коэффициент α : для $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$ $\alpha = 6,5 \text{ эВ}^{-1}$, для $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$ $\alpha = 3,58 \text{ эВ}^{-1}$.

Проведенный анализ механизмов токопереноса через исследуемые гетероструктуры $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$ и $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$ при обратном смещении показал, что зависимость $I_{обр}(U)$ хорошо описывается в рамках туннельной модели токопереноса вследствие очень малых тепловых составляющих.

В случае резкого перехода выражение для туннельного тока при обратном смещении имеет вид [7]

$$I_{rev} \approx a_0 \exp \frac{b_0}{\sqrt{\phi_0(T) - eU}}, \quad (3)$$

где a_0 – параметр, определяемый вероятностью заполнения энергетических уровней, с которых происходит туннелирование;

b_0 – параметр, определяющий скорость изменения тока при изменении напряжения.

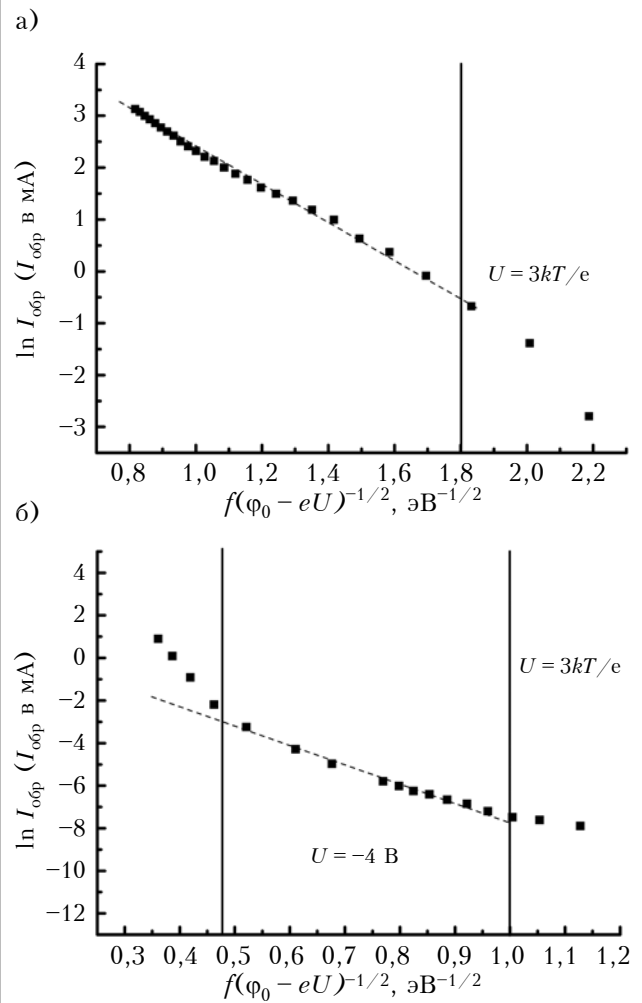


Рис. 3. Обратные ветви ВАХ в полулогарифмическом масштабе для гетероструктур $\text{NiO}/p\text{-CdTe}$ (а) и $\text{NiO}/n\text{-CdTe}$ (б)

Таким образом, согласно уравнению (3), аппроксимация обратных ветвей ВАХ прямыми линиями в координатах $\ln(I_{rev}) = f(\phi_0 - eU)^{-1/2}$ (рис. 3) подтверждает доминирование туннельного механизма токопереноса.

Как видно из рис. 3, б, для гетероперехода NiO/*n*-CdTe в области больших обратных смещений ($U < -4$ В) наблюдается значительное отклонение экспериментальных точек от прямой зависимости, которая описывается формулой (3), что связано с процессами лавинного умножения носителей заряда в результате ударной ионизации [4].

Спектральное распределение квантовой эффективности η исследуемых гетеропереходов определяется как отношение количества носителей заряда, формирующих ток короткого замыкания, к числу падающих фотонов при освещении гетероперехода со стороны пленки NiO за единицу времени и характеризуется шириной полосы на половине его высоты $\delta_{1/2} = 0,36$ мкм (рис. 4).

Энергетическое положение длинноволнового края спектра квантовой эффективности хорошо согласуется с шириной запрещенной зоны

CdTe. Коротковолновой край спектральной фоточувствительности хорошо согласуется с шириной запрещенной зоны NiO. Отсутствие резкого коротковолнового края в спектрах квантовой эффективности связано с малой толщиной пленки NiO и ее поликристаллической структурой.

Из световой ВАХ гетероперехода NiO/*n*-CdTe (рис. 4, б) были определены следующие параметры: напряжение холостого хода $U_{xx} = 0,26$ В, ток короткого замыкания $I_{кз} = 58,7$ мкА/см², коэффициент заполнения $FF = 0,23$ при интенсивности освещения 80 мВт/см².

Выводы

Таким образом, исследования электрических свойств гетеропереходов NiO/*n*-CdTe и NiO/*p*-CdTe при комнатной температуре показали, что электрический ток при небольших прямых смещениях ($0 < U < 0,5$ В для NiO/*n*-CdTe и $0 < U < 0,15$ В для NiO/*p*-CdTe) формируется за счет генерационно-рекомбинационных процессов в области пространственного заряда, при большем прямом смещении ($U > 0,5$ В для NiO/*n*-CdTe, $U > 0,15$ В для NiO/*p*-CdTe) основным механизмом токопереноса является туннелирование через область пространственного заряда, которое хорошо описывается формулой Нюмена для туннельного тока. При обратных смещениях основным механизмом токопереноса для обеих гетероструктур является туннелирование через область пространственного заряда.

Полученные результаты помогут исследователям лучше разобраться в процессах, протекающих в гетеропереходах NiO/*n*-CdTe и NiO/*p*-CdTe, что поможет улучшить их свойства и параметры и применять в электронной технике.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Nel J. M., Auret F. D., Wu L. et al. Fabrication and characterisation of NiO/ZnO structures // Sensors and Actuators B: Chemical. — 2004. — Vol. 100. — P. 270–276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2003.12.054>.
2. Sasi B., Gopchandran K. G., Manoj P. K. et al. Preparation of transparent and semiconducting NiO films // Vacuum. — Vol. 68. — P. 149–154. [http://dx.doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00299-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00299-3)
3. Aven M., Prener J.S. Physics and chemistry of II-VI compounds. — Amsterdam: North-Holland, 1967.
4. Solovan M.N., Brus V.V., Maryanchuk P.D., Ilashchuk M.I., Rappich J., Nickel N., Abashin S.L. Fabrication and characterization of anisotype heterojunctions n-TiN/*p*-CdTe // Semiconductor Science and Technology. — 2014. — Vol. 29, N 015007. <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/29/1/015007>.
5. Sze S.M., Kwok K. Physics of semiconductor devices. — New Jersey: Wiley, 2007.
6. Шарма Б.Л., Пурохит Р.К. Полупроводниковые гетеропереходы. — Москва: Сов. радио, 1979.
7. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. — Москва: Энергоатомиздат, 1987.

Дата поступления рукописи
в редакцию 05.09 2016 г.

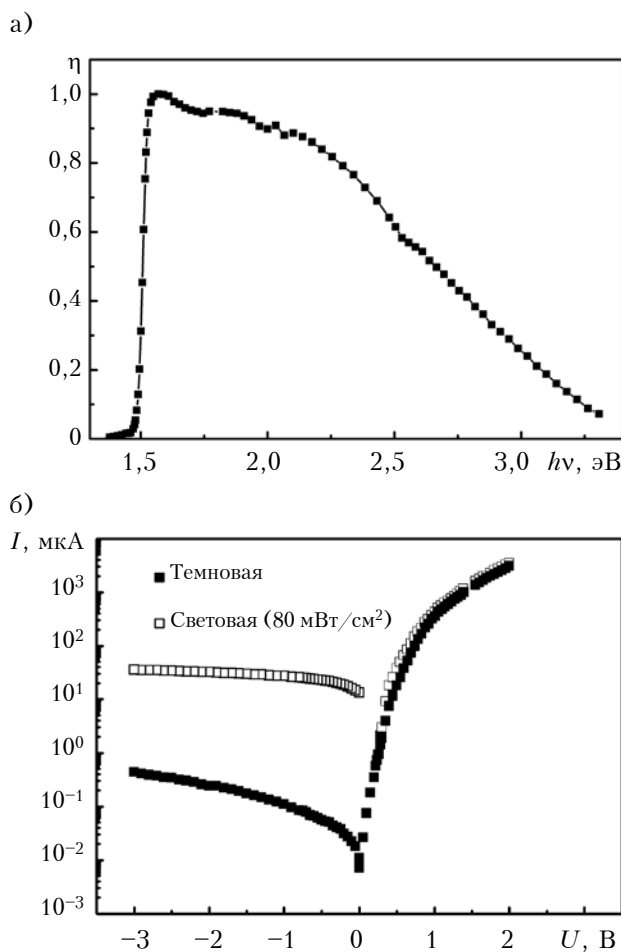


Рис. 4. Спектральное распределение квантовой эффективности гетероперехода NiO/*n*-CdTe (а), а также его темновая и световая ВАХ (б)

Г. П. ПАРХОМЕНКО, П. Д. МАР'ЯНЧУК

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

E-mail: h.parkhomenko@chnu.edu.ua

ЕЛЕКТРИЧНІ І ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОСТРУКТУР NiO/p-CdTe ТА NiO/n-CdTe

Методом реактивного магнетронного напилення тонких плівок NiO на підкладки з кристалів CdTe р- та n-типу провідності виготовлено гетероструктури NiO/n-CdTe та NiO/p-CdTe. Досліджено їх темнову і світлову вольт-амперні характеристики. Встановлено, що основними механізмами струмопереносу при прямому зміщенні є генераційно-рекомбінаційний і тунелювання, при зворотньому – тунелювання.

Ключові слова: гетероперехід, тонка плівка, механізми струмопереносу, NiO, CdTe.

DOI: 10.15222/TKEA2016.4-5.29
UDC 621.315.592

H. P. PARKHOMENKO, P. D. MARYANCHUK

Ukraine, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

E-mail: h.parkhomenko@chnu.edu.ua

ELECTRICAL AND PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF HETEROSTRUCTURES NiO/p-CdTe AND NiO/n-CdTe

In this study, we investigate the electrical and photoelectric properties of heterostructures formed by the reactive magnetron sputtering of thin film NiO onto p-CdTe and n-CdTe substrates. The current-voltage characteristics of the heterojunctions were measured at room temperature. The dominating current transport mechanisms through the NiO/n-CdTe and NiO/p-CdTe heterojunctions at the forward biases are generation-recombination and tunnel, at the reverse biases is tunnel current transport mechanisms. The heterojunctions under investigation generate open-circuit voltage $U_{oc} = 0.26$ V and short-circuit current $I_{sc} = 58.7 \mu A/cm^2$ under illumination $80 mW/cm^2$.

The research results can be used for better understanding of the processes occurring in heterojunctions NiO/n-CdTe and NiO/p-CdTe, to further improve their properties and parameters.

Keywords: heterojunctions, thin film, charge transport mechanisms, NiO, CdTe.

REFERENCES

1. Nel J. M., Auret F. D., Wu L., Legodi M. J., Meyer W. E., Hayes M. Fabrication and characterisation of NiO/ZnO structures. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2004, vol. 100, pp. 270-276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2003.12.054>.
2. Sasi, B., Gopchandran, K. G., Manoj, P. K., Koshy, P., Rao, P. P., Vaidyan, V. K.. Preparation of transparent and semiconducting NiO films. *Vacuum*, vol. 68, pp. 149-154. [http://dx.doi.org/10.1016/S0042-207X\(02\)00299-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00299-3)
3. Aven M., Prener J.S. *Physics and Chemistry of II-VI Compounds*. Amsterdam, North-Holland, 1967, 580 p.

4. Solovan M.N., Brus V.V., Maryanchuk P.D., Ilashchuk M.I., Rappich J., Nickel N., Abashin S.L. Fabrication and characterization of anisotype heterojunctions n-TiN/p-CdTe. *Semiconductor Science and Technology*, 2014, vol. 29, no. 015007. <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/29/1/015007>.
5. Sze S.M., Kwok K. *Physics of semiconductor devices*, New Jersey, Wiley, 2007, 815 p.
6. Sharma B.L., Purohit R.K. *Semiconductor heterojunctions*, Pergamon Press, 1974.
7. Farenbukh A., B'yub R. [Solar cells: Theory and Experiment]. Moscow, Energoatomizdat, 1987, 278 p.

К. т. н. Н. Ф. КАРУШКИН, В. В. МАЛЫШКО, В. В. ОРЕХОВСКИЙ, А. А. ТУХАРИНОВ

Украина, г. Киев, ГП НИИ «Орион»

E-mail: ndiorion@tsua.net

КОММУТАЦИОННЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ УСТРОЙСТВА НА $p-i-n$ -ДИОДАХ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Представлены результаты исследований и разработки выключателей и переключателей с использованием $p-i-n$ -диодов сосредоточенного типа, обеспечивающих время переключения на уровне единиц наносекунд. С целью увеличения развязки в закрытом состоянии (потери запираания) около 40 дБ в устройствах применено каскадное включение диодов в волноводную и микрополосковую линии передачи на электрической длине $\theta = \pi/2$. Представлены результаты исследований по созданию коммутационных устройств коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн ($f = 300$ ГГц) с использованием продольно- и поперечно-распределенных $p-i-n$ -структур.

Ключевые слова: выключатель СВЧ, миллиметровый диапазон длин волн, $p-i-n$ -диод, потери пропускания, потери запираания, время переключения.

Разработкам коммутационных устройств посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов [1–5]. Однако развитие компонентной базы для создания радиоэлектронной аппаратуры миллиметрового диапазона длин волн, включая создание устройств для коммутации мощности, по-прежнему остается актуальным [6].

Известные однодиодные быстродействующие устройства миллиметрового диапазона обеспечивают развязку в закрытом состоянии (потери запираания) на уровне 20–25 дБ, что для ряда применений является недостаточным [7]. Кроме того, является проблематичным создание в коротковолновой части миллиметрового диапазона (частота $f = 300$ ГГц) коммутационных управляемых устройств с применением диодных структур сосредоточенного типа [8, 9].

В настоящей статье описаны исследования по разработке и созданию быстродействующих выключателей и переключателей миллиметрового диапазона частот (30–180 ГГц) в волноводном исполнении с каскадным включением диодов, разделенных отрезками линии передачи, с потерями запираания более 40 дБ в рабочей полосе частот 30–40%. Исследовалась также возможность создания устройств управления мощностью СВЧ в диапазоне 200–400 ГГц с использованием распределенных $p-i-n$ -структур продольного и поперечного типов.

УСТРОЙСТВА С КАСКАДНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ ДИОДОВ

Рассмотрим параметры приведенной на рис. 1 схемы каскадного включения двух диодов, модель которых состоит из нормированных активной (G) и емкостной (B) проводимостей.

Для анализа воспользуемся симметрией схемы относительно $a-a'$. Согласно [10] коэффициент передачи таких схем определяется выражением

$$T_{11} = (T_{11}^n)^2 - (T_{12}^n)^2,$$

$$\text{где } T_{11}^n = \left(1 + \frac{G + jB}{2}\right) \cdot e^{j\theta/2};$$

$$T_{12}^n = \left(1 + \frac{G + jB}{2}\right) \cdot e^{-j\theta/2};$$

индекс n — элементы матрицы передачи четырехполюсника.

С учетом того, что электрическая длина $\theta = \pi/2$, коэффициент передачи T_{11} и потери в схеме L_{Π} можно описать выражениями

$$T_{11} = -(B + GB) + j(1 + G + G^2/2 - B^2/2);$$

$$L_{\Pi} = |T_{11}|^2 = G^4/4 + G^3 + 2G^2 + 2G + B^2/4 + B^2G^2/2 + B^2G/2 + 1.$$

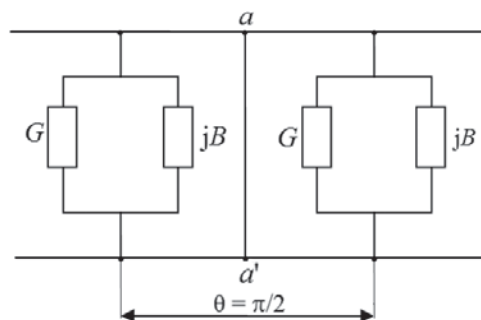


Рис. 1. Упрощенная эквивалентная схема каскадного включения двух диодов

В режиме открытых диодов и скомпенсированной емкостной проводимости $B = 0$, активная проводимость G_- мала и потери пропускания $L_{\text{ПЗ}} \approx 1 + 2G_-$.

При закрытых диодах активная проводимость диода G_+ велика, и потери запираения составляют $L_{\text{ПЗ}} = G_+^4/4$, а при включении одного диода потери запираения составляют $L_{\text{ПЗ}} = G_+^2/4$.

Выражение этого соотношения в децибелах имеет вид $L_{\text{ПЗ}}(\text{дБ}) \approx 2L_3 + 6$, а при N каскадно включенных диодах потери запираения определяются выражением $L_{\text{ПЗ}}(\text{дБ}) \approx NL_{\text{ПЗ}} + 6(N - 1)$.

Проведенный анализ простой модели включения двух диодов в линию передачи на электрической длине $\theta = \pi/2$ указывает на значительное увеличение запирающего действия выключателя при незначительном увеличении потерь в режиме пропускания.

Разработка быстродействующих выключателей миллиметрового диапазона с повышенным уровнем потерь в режиме запираения ($L_{\text{ПЗ}} \geq 40$ дБ) проводилась с использованием корпусных диодов, которые устанавливались в волноводном канале, и диодов с минимальными паразитными емкостью и индуктивностью, которые устанавливались в микрополосковую линию.

Выключатели инверсного типа с корпусными диодами

Выключатели такого типа находят применение в РЛС для защиты приемника и для стробирования сигналов работы передающего и приемного трактов импульсами различной длительности.

Использование корпусных $p-i-n$ -диодов для работы в миллиметровом диапазоне имеет ограничения из-за больших значений паразитных параметров корпуса и элементов его монтажа, поскольку в этом случае их размеры соизмеримы с длиной волны. Вследствие этого при расчетах корпус не может рассматриваться как включенная емкость сосредоточенного типа. С точки зрения реализации параллельного резонанса (высокоимпедансного состояния) в схеме диода в режиме пропускания СВЧ-мощности целесообразнее корпус диода рассматривать как радиальную линию, расположенную у основа-

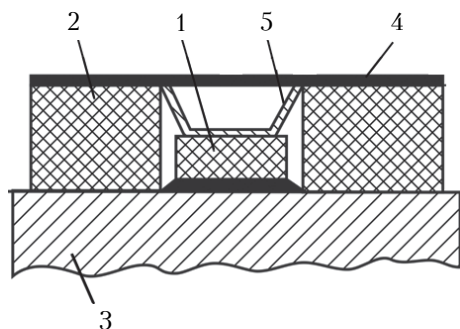


Рис. 2. Конструкция переключательного диода: 1 — диодная структура; 2 — рубиновая втулка; 3 — медное основание; 4 — крышка; 5 — золотая плющена

ния широкой стенки волновода [11]. При этом размеры корпуса должны обеспечивать трансформацию входного импеданса линии передачи к клеммам диодной структуры.

Величина и характер импеданса такой радиальной линии, частотные зависимости ее входной проводимости, а также активная и реактивная составляющие диодной структуры (рис. 2, 3) в режимах положительного и отрицательного смещений приведены и подробно рассмотрены в [7, 12]. Результаты этих исследований были использованы при разработке выключателя с каскадным включением диодов.

На рис. 4 представлены экспериментальные частотные зависимости потерь пропускания и потерь запираения выключателя с диодами корпусного типа, включенными каскадно в волноводную линию передачи. Выключатель, содержащий два диода, обеспечивает коммутацию СВЧ-мощности с развязкой в режиме запираения более 40 дБ в рабочей полосе примерно 20% за время не хуже 2 нс.

В ряде случаев для повышения уровня коммутируемой СВЧ-мощности целесообразно включать в сечение волновода параллельно два дио-

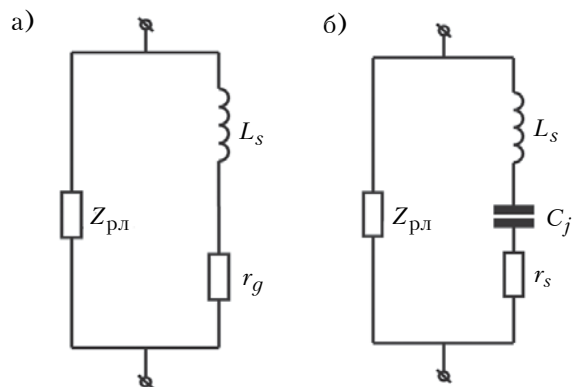


Рис. 3. Эквивалентная схема переключательного диода при положительном (а) и отрицательном (б) электрическом смещении:

r_g — дифференциальное сопротивление диода; L_s — индуктивность монтажа; C_j — емкость диодной структуры; r_s — сопротивление потерь; $Z_{\text{р.л}}(r)$ — импеданс радиальной линии, приводимый к диодной структуре

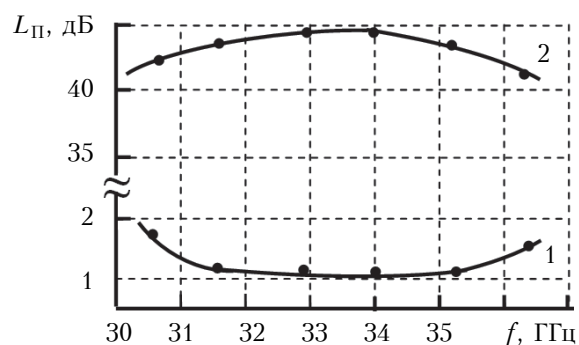


Рис. 4. Экспериментальные зависимости потерь пропускания (1) и потерь запираения (2) выключателя с диодами корпусного типа, включенными каскадно в волноводную линию передачи

да, конструкция которых представлена на рис. 2. Конструктивно выключатели такого типа выполнены в виде волноводных вставок с выводом для внешнего управляющего напряжения в боковой стенке волновода. Волноводные вставки, содержащие два диода, включенные параллельно в одном сечении волновода, создают возможность переключения каналов передачи электромагнитной энергии с использованием волноводных тройников.

Переключатели на два направления в миллиметровом диапазоне имеют следующие параметры:

- рабочая полоса частот 10%;
- время переключения 5 нс;
- потери запираения между каналами 25 дБ;
- потери пропускания 1,2–1,5 дБ;
- уровень переключаемой мощности не менее 2 Вт;
- диапазон температуры $-40...+60^{\circ}\text{C}$.

Следует отметить, что в качестве диэлектрических втулок для сборки диодов для коммутационных устройств в миллиметровом диапазоне длин волн использованы промышленные часовые рубиновые камни, обладающие необходимыми для этих целей чистотой обработки и прочностью и имеющие широкую номенклатуру размеров. Так, в коротковолновой части СВЧ-диапазона ($f = 150\text{ ГГц}$) использованы рубиновые втулки высотой 0,15–0,2 мм, внешний и внутренний диаметр которых составляет 0,4 и 0,2 мм, соответственно.

Выключатели на диодах с минимальным значением паразитных параметров

Частотные зависимости потерь запираения описанных выше выключателей имеют, как правило, резонансный характер. Этот недостаток можно устранить, применив каскадное включение диодов с минимальными паразитными параметрами в линию передачи с малым волновым сопротивлением ($Z_B \approx 30\text{--}50\text{ Ом}$).

При разработке выключателей на $p-i-n$ -диодах с малыми паразитными параметрами в качестве линии передачи была использована несимметричная полосковая линия (НПЛ), образованная за счет частичного перекрытия металлических линий, нанесенных на противоположные стороны плоскопараллельной диэлектрической подложки — несимметричной щелевой линии (НЩЛ). В данном случае НЩЛ помещается в стандартный волновод в E -плоскости и включает в себя переходные распределенные участки согласования волновых сопротивлений.

Предложенная конструкция НЩЛ позволяет выполнять линию передачи практически с любым волновым сопротивлением. Кроме того, НЩЛ обладает широкополосностью и простотой конструктивной реализации полупроводниковых СВЧ-элементов на ее основе в комбинации с несимметричной полосковой линией. Подобное соединение микрополосковых линий в миллиметро-

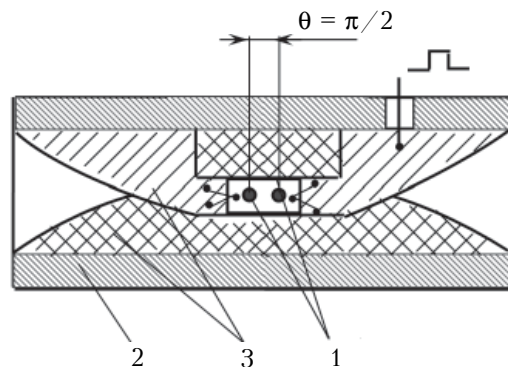


Рис. 5. Конструкция выключателя:
1 — $p-i-n$ -диоды; 2 — волновод; 3 — НЩЛ

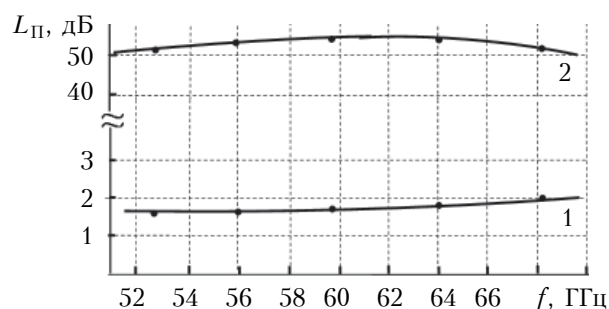


Рис. 6. Частотные характеристики потерь пропускания (1) и потерь запираения (2) выключателя, представленного на рис. 4

вом диапазоне применено при разработке фазовых манипуляторов [13]. Материалом для такой линии выбран металлизированный дюрюид с толщиной диэлектрического слоя 0,254 мм, малыми погонными потерями и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,5$. Особенностью выключателя является наличие в микрополосковой линии вставки, состоящей из двух $p-i-n$ -диодов, расположенных последовательно на расстоянии $\theta \approx \pi/2$ друг от друга на общем металлическом основании. Электрофизические параметры среды такой вставки выбраны близкими к параметрам линии передачи.

Конструкция выключателя приведена на рис. 5, а его типичные частотные характеристики потерь пропускания и запираения — на рис. 6. Потери запираения выключателя такого типа составляют около 50 дБ при прямом электрическом смещении на диодах в рабочей полосе не менее 30% при воздействии непрерывной СВЧ-мощности не менее 1 Вт. Повышенная устойчивость работы достигнута за счет того, что вставка с диодами смонтирована на теплоотводе, позволяющем снизить их тепловое сопротивление.

Приведенные частотные характеристики обеспечиваются при емкости диодов не более 0,018 пФ и волновом сопротивлении линии передачи 30–50 Ом. Напряжение обратного смещения составляет -10 В , ток прямого смещения — примерно 10 мА, время переключения СВЧ-мощности — не более 10 нс.

УСТРОЙСТВА С ДИОДНЫМИ СТРУКТУРАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ТИПА

В коротковолновой части СВЧ-диапазона применение обычных плоскостных диодных структур сосредоточенного типа представляется проблематичным, поскольку они должны иметь очень малые размеры. В связи с этим возрастает необходимость исследования объемных явлений в полупроводниках распределенного типа, весьма перспективных для создания элементов электронной техники на более высоких частотах. Применение в миллиметровом диапазоне нашли выключатели, выполненные на продольно-распределенной слоистой $p-i-n$ -структуре, расположенной в сечении волновода [14, 15].

Для построения эквивалентной схемы слоистой структуры и определения ее параметров использовались результаты расчета слоистой металлодиэлектрической структуры конечной длины, расположенной в прямоугольном волноводе [16].

Рассмотрим представленную на **рис. 7** слоистую $p-i-n$ -структуру. Ее характеристики рассеяния можно получить из решения задачи отражения волны H_{01} от полубесконечной металлической ступеньки в прямоугольном волноводе, узкое сечение которого заполнено высокоомным полупроводником. Для данной конкретной задачи должно выполняться условие $d/\lambda_\epsilon \ll 1$, где d — толщина i -области, λ_ϵ — длина волны в i -области.

Эквивалентная схема слоистой полуограниченной структуры представлена на **рис. 8, а**.

Коэффициенты отражения $K_{\text{отр}}$ и прохождения $K_{\text{пр}}$ такой схемы определяются выражениями

$$K_{\text{отр}} = \frac{Y_1 - (Y_2 - j\omega C)}{Y_1 + (Y_2 + j\omega C)}, \quad (1)$$

$$K_{\text{пр}} = \frac{2Y_2}{Y_1 + (Y_2 + j\omega C)}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$.

Эквивалентная схема слоистой структуры длиной l представлена на **рис. 8, б**. Ее параметры могут быть выражены через геометрические размеры, длину волны и диэлектрическую проницаемость следующими формулами:

$$K_{\text{отр}} = 2\omega CY_2 (Y_1^2 + Y_2 + \omega C^2 \operatorname{tg} ql) \times \\ \times [2\omega CY_2 + (Y_1^2 + Y_2^2 - \omega^2 C^2) \operatorname{tg} ql - \\ - j \cdot 2Y_1 (Y_2 - \omega C \operatorname{tg} ql)]^{-1}, \quad (3)$$

где $q = \sqrt{K^2 - \frac{\pi}{a}}$; $K = 2\pi/(\lambda_\epsilon)$;

$$Y_1 = \frac{a/b}{20\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_\epsilon}{2a}\right)^2} \text{ [Ом}^{-1}\text{]}; \quad (4)$$

$$Y_2 = \frac{a/d}{20\pi} \sqrt{\epsilon - \left(\frac{\lambda_\epsilon}{2a}\right)^2} \text{ [Ом}^{-1}\text{]}; \quad (5)$$

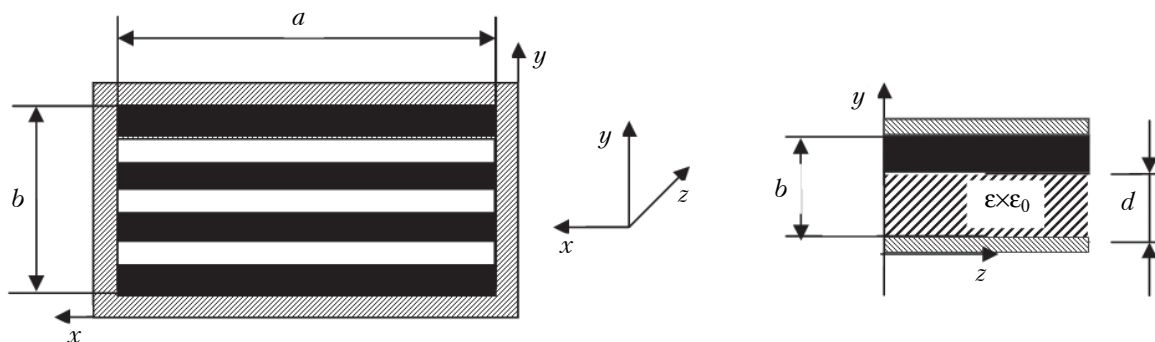


Рис. 7. Слоистая металлодиэлектрическая структура:

a — размер широкой стенки волновода; b — размер узкой стенки волновода; z — ось, вдоль которой распространяется электромагнитная волна

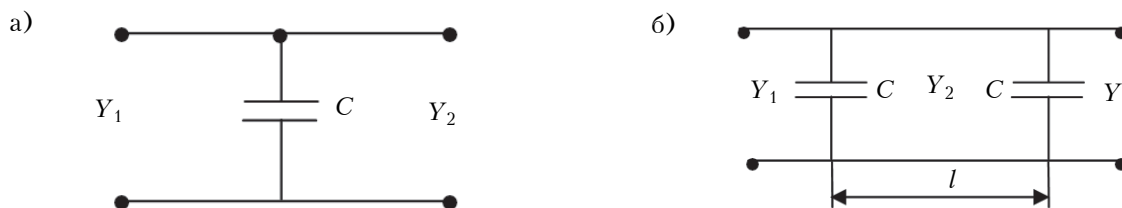
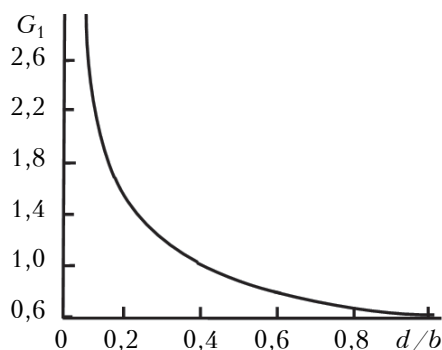
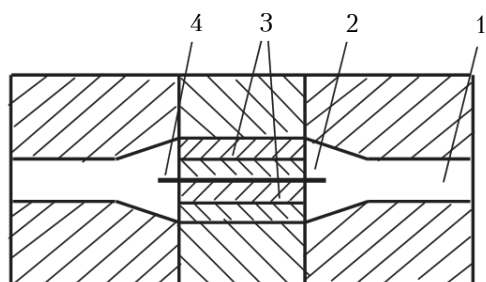


Рис. 8. Эквивалентная схема слоистой полуограниченной структуры (а) и слоистой структуры длиной l (б): Y_1, Y_2 — волновая проводимость; C — емкость

Рис. 9. Зависимость константы G_1 от отношения d/b Рис. 10. Конструкция выключателя с продольно-распределенной слоистой $p-i-n$ -структурой: 1 — волновод сечением $0,35 \times 0,7$ мм; 2 — переход с сечения $0,35 \times 0,7$ на $0,8 \times 0,7$ мм; 3 — слоистая $p-i-n$ -структура (толщина i -области 150 мкм); 4 — тонкая металлическая перегородка

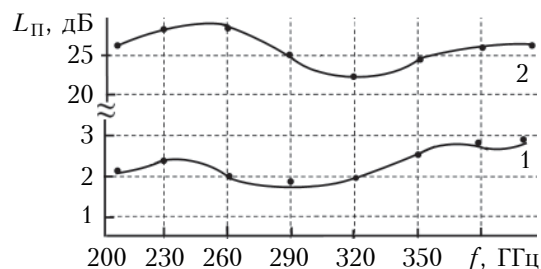
$$C = \frac{a}{1,8\pi^2} \left\{ \left[1 - \left(\frac{\lambda_{\varepsilon}}{20} \right)^2 \right] G_1 + \left[\varepsilon - \left(\frac{\lambda_{\varepsilon}}{20} \right)^2 \right] \cdot 0,7 \right\} \text{ [пФ]}. \quad (6)$$

Входящая в формулу (6) константа G_1 зависит от соотношения размеров d и b (см. **рис. 9**).

Эквивалентная схема слоистой структуры конечной длины (**рис. 8, б**) может быть применена при разработке полупроводниковых устройств для управления мощностью СВЧ.

На **рис. 10** представлена конструкция выключателя с продольно-распределенной слоистой $p-i-n$ -структурой, предназначенного для работы в диапазоне частот 200–400 ГГц. Экспериментальные частотные характеристики такого выключателя, приведенные на **рис. 11**, указывают на возможность создания широкополосных устройств для управления уровнем СВЧ-мощности в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Однако при этом необходимо учитывать возрастание потерь в продольно-распределенных $p-i-n$ -структурах с увеличением рабочей частоты.

В обесточенном состоянии диода потери пропускания в устройстве зависят в основном от по-

Рис. 11. Частотные характеристики потерь записи (1) и пропускания (2) выключателя с продольно-распределенной слоистой $p-i-n$ -структурой

стоянной затухания в полупроводниковой структуре, величина которой определяется поглощением СВЧ-энергии свободными носителями a_0 , диэлектрическими потерями в полупроводнике при отсутствии носителей a_{ε} и контактными потерями a_k . Сумма $a_0 + a_{\varepsilon}$ для высокоомного кремния с проводимостью около $10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ составляет 0,3–0,4 дБ/см в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. Основной вклад в величину постоянной затухания вносят контактные потери a_k , которые увеличиваются с уменьшением длины волны. Для $p-i-n$ -структур с толщиной i -области 0,4 мм и толщиной легированных слоев порядка 0,7–1,0 мкм с проводимостью $5 \cdot 10^2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, контактные потери составляют 1 дБ/см на длине волны 8 мм и 14 дБ/см на длине волны 1 мм. Для уменьшения a_k в структурах, применяемых в субмиллиметровом диапазоне, необходимо уменьшать толщину легированных слоев и увеличивать их проводимость до 10^4 – $10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Продольно-распределенные $p-i-n$ -структуры с малой толщиной легированных слоев и большим значением проводимости имеют относительно малое значение постоянной затухания в миллиметровом диапазоне. Уменьшить постоянную затухания можно также при частичном заполнении волноводного тракта [12]. Широкополосная компенсация отражений на входе и выходе устройства с полупроводниковой структурой, расположенной в волноводном тракте, может быть достигнута с помощью диэлектрических вставок или с помощью трансформаторов волноводного типа.

Рассмотрим полупроводниковую $p-i-n$ -структуру поперечно-распределенного типа, представленную на **рис. 12**. Эта структура представляет собой тонкую пластину высокоомного кремния, установленную поперек волновода (лучевода). По сторонам пластины ортогонально электрическому полю электромагнитной волны сформированы линейные переходы, образующие контакты, которые инжектируют дырки с одной стороны и электроны с другой в объем пластины. Изменение проводимости полупроводникового материала осуществляется подачей прямого смещения на инжектирующие контакты.

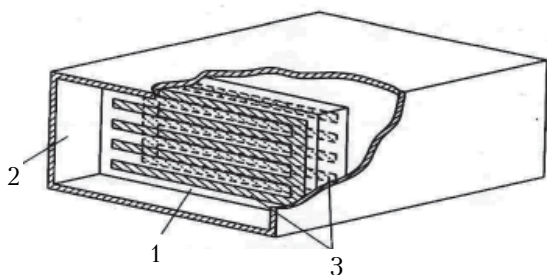


Рис. 12. Конструкция выключателя с поперечно-распределенной слоистой $p-i-n$ -структурой: 1 — кремниевая пластина; 2 — волновод; 3 — структура, в которую инжектируются дырки (с одной стороны) и электроны (с другой стороны)

Необходимо заметить, что плазма в объеме полупроводника обеспечивает требуемую величину развязки (более 20 дБ) лишь в том случае, если она равномерно распределена в объеме полупроводниковой структуры, помещенной в волновод. Этого можно достичь в том случае, когда расстояние между металлическими полосками контактной структуры равно примерно удвоенной длине амбиполярной диффузии, а падение напряжения вдоль контактных полосок невелико.

Также следует обратить внимание на то, что изменение относительного положения контактных полосок на противоположных сторонах кремниевой пластины не увеличивает вносимые потери при условии $\pi t/d > 2,2$, где t — толщина кремниевой пластины, d — расстояние между центрами металлических полосок. Если величина этого отношения выбрана правильно, можно использовать металлические контакты, покрывающие большую часть поверхности кремниевой пластины. Это позволяет получить более однородную по объему плазму и увеличить проводимость $p-i-n$ -структуры в режиме отражения СВЧ-мощности.

Устройства с применением поперечно-распределенных полупроводниковых $p-i-n$ -структур требуют достаточно больших токов для управления (единицы ампер) и обеспечивают быстрое действие на уровне единиц микросекунд. Лучших результатов можно достичь при использовании поверхностно-ориентированных $p-i-n$ -структур, сформированных определен-

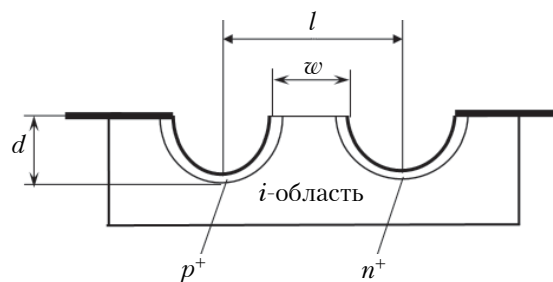


Рис. 13. Конструкция поверхностно-ориентированного диода

ным образом на одной из поверхностей полупроводниковой пластины, имеющей высокое удельное сопротивление ($\rho \geq 10000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). В такой конструкции увеличение проводимости происходит не по всему объему кремниевой пластины, помещенной в волновод, а в областях, параллельных вектору электрического поля с ориентацией H_{01} .

При разработке электрически управляемой кремниевой пластины, помещенной в волновод, учитывались электрофизические параметры известных поверхностно-ориентированных диодов. В процессе ее изготовления использовались стандартные технологические приемы. Сначала в кремнии вытравливались каналы смещения, которые имели «карманы» — участки глубиной 20–30 мкм в области легирования примесями n^+ - и p^+ -типа (рис. 13). Расстояние между карманами l выбирается из условия $l < \lambda/(2\sqrt{\epsilon})$. Ширина i -области $w \approx 30$ мкм. При соотношении размеров $w/d \approx 1$ и глубине карманов $d = 15$ мкм сопротивление полупроводникового диода составляет 2,5–3,0 Ом при токе 50 мА.

Полупроводниковая кремниевая пластина размерами 0,35×0,7 мм содержит девять каналов смещения, ортогональных электрическому полю электромагнитной волны, распространяющейся по волноводу сечением 0,35×0,7 мм. Толщина пластины равна примерно 150 мкм, что составляет половину длины волны в кремнии на частоте 300 ГГц.

На рис. 14 представлены эскизы кремниевой пластины, содержащей поверхностно-

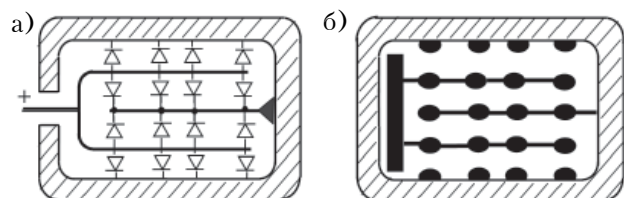


Рис. 14. Конструкция выключателя волноводного типа, содержащего поверхностно-ориентированные $p-i-n$ -структуры:

а — схема соединения поверхностно-ориентированных $p-i-n$ -структур; б — внешний вид поверхности кремниевой структуры, установленной в волновод

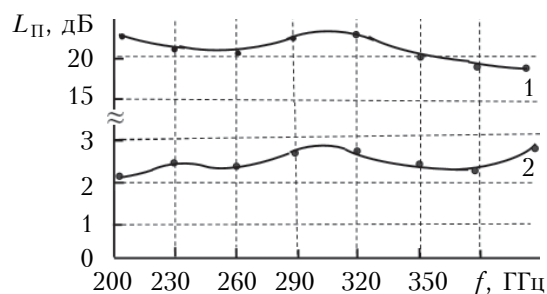


Рис. 15. Частотные зависимости потерь пропускания (1) и потерь запирающего (2) решетчатой поверхности ориентированных $p-i-n$ -структур

ориентированные $p-i-n$ -структуры, а на рис. 15 — частотные характеристики ее потерь пропускания и запирапия. Потери запирапия более 20 дБ достигаются при токе управления 0,5 А. Быстродействие составляет около 500 нс. Расширение рабочей полосы частот достигается установкой диэлектрических вставок с обеих сторон кремниевого окна.

Заключение

Проведенные исследования показали, что каскадное включение диодов в линию передачи позволяет увеличить потери запирапия и расширить рабочую полосу быстродействующих выключателей, работающих в миллиметровом диапазоне. При этом возможно применение корпусированных диодов (для выключателей инверсного типа) и диодов с минимальным значением паразитных параметров, включенных в линию с малым волновым сопротивлением. В первом случае в качестве корпусов были использованы часовые рубиновые камни определенных размеров. Предложенная конструкция обеспечила уровень коммутируемой СВЧ-мощности выключателя не менее 2 Вт, величину потерь в режиме запирапия не менее 40 дБ в рабочей полосе частот около 15% за время не хуже 2 нс. Во втором случае рабочая полоса частот выключателя, выполненного с применением несимметричной щелевой линии, содержащей вставку с диодами, составила около 40% при потерях запирапия более 40 дБ.

Оценивая результаты, полученные при разработке полупроводниковых коммутирующих устройств миллиметрового диапазона длин волн, можно заключить, что в коротковолновой части СВЧ-диапазона ($f > 200$ ГГц) применение $p-i-n$ -диодов с сосредоточенными параметрами является неперспективным. В этом диапазоне не представляется перспективным использование полупроводников распределенного типа, когда взаимодействие с СВЧ-энергией происходит по всему объему материала и возможно расширение полосы пропускания и улучшение условий рассеяния. При этом в качестве унифицированных элементов управляющих устройств коротковолновой части миллиметрового диапазона, а также в квазиоптических устройствах субмиллиметрового диапазона могут применяться поверхностно-ориентированные $p-i-n$ -структуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Балыко А.А., Залютдинова О.В., Ольчев Б.М., Юсупова Н.И. Выключатели и аттенюаторы на $p-i-n$ -диодах // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. — 1991. — Вып. 7. — С. 71.
2. Макаренко В. Использование $p-i-n$ -диодов в широкополосных управляемых аттенюаторах // Электронные компоненты и системы. Телекоммуникация и связь. — 2012. — № 9. — С. 38–44.
3. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Куликов М.Ю. Микрополосковый $p-i-n$ -диодный СВЧ-выключатель // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 2011. — Т. 54, № 4. — С. 51–60.
4. Inder J. Bahl. Control components using Si, GaAs and GaN technologies. — Artech House, 2014.
5. Caverly R.H. Microwave and RF semiconductor control device modeling. — Artech House, 2016.
6. Алавердян С.А., Боков С.И., Булгаков В.О. и др. Терагерцовый диапазон частот: электронная компонентная база, вопросы метрологического обеспечения // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. — 2012.
7. Карушкин Н.Ф. Характеристики быстродействующих амплитудных переключателей инверсного типа миллиметрового диапазона // Техника и приборы СВЧ. — 2010. — № 1. — С. 11–15.
8. Armstrong A. Monolithic control components for high power mm-waves // Microwave Journal. — 1985. — N 9. — P. 197–201.
9. Rahm M., Li J.-S., Padilla W.J. THz wave modulators: brief review on different modulation techniques // Journal of infrared, millimeter wave and terahertz waves. — 2013. — Vol. 34. — P. 1–27.
10. Вайсблат А.В. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах. — Москва: Радио и связь, 1987.
11. Справочник по волноводам / Пер. с англ. под ред. Я.Н.Фельда. — Москва: Сов. радио, 1952.
12. Карушкин Н.Ф. Устройства для переключения и модуляции СВЧ-мощности в миллиметровом диапазоне // Радиофизика и электроника. — 2004. — Т. 9, № 3. — С. 596–602.
13. Карушкин Н.Ф., Симончук В.И., Малышко В.В., Ореховский В.И. Устройства для управления амплитудой и фазой СВЧ-сигналов в миллиметровом диапазоне длин волн // Техника и приборы СВЧ. — 2008. — № 1. — С. 36–41.
14. Дзехцер Г.Б., Орлов О.С. $P-i-n$ -диоды в широкополосных устройствах СВЧ. — Москва: Сов. радио, 1970.
15. СВЧ-устройства на полупроводниковых диодах. Проектирование и расчет / Под ред. И.В.Мальского и Б.В.Сестрорецкого. — Москва: Сов. радио, 1969.
16. Карушкин Н.Ф., Фиалковский А.Т. Расчет слоистой металлодиэлектрической структуры конечной длины, расположенной в прямоугольном волноводе // Изв. вузов. Радиофизика. — 1976. — Т. XIX, № 8. — С. 1218–1224.

Дата поступления рукописи
в редакцию 22.06 2016 г.

М. Ф. КАРУШКИН, В. В. МАЛИШКО, В. В. ОРЕХОВСКИЙ, А. А. ТУХАРИНОВ

Україна, м. Київ, ДП НДІ «Оріон»
E-mail: ndiorion@tsua.net

КОМУТАЦІЙНІ КЕРОВАНІ ПРИСТРОЇ НА $p-i-n$ -ДІОДАХ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Представлено результати досліджень і розробки вимикачів і перемикачів з використанням $p-i-n$ -діодів скупченого типу, що забезпечують час перемикачів на рівні одиниць наносекунд. З метою збільшення втрат запираччя (приблизно 40 дБ) в пристроях застосовано каскадне включення діодів в хвильоводну і мікросмугову лінії передачі на електричній довжині $\theta = \pi/2$. У короткохвильовій частині міліметрового

діапазону довжин хвиль ($f = 300$ ГГц) представлено результати досліджень по створенню комутаційних пристроїв з використанням подовжно- і поперечно-розподілених $p-i-n$ -структур.

Ключові слова: вимикач НВЧ, міліметровий діапазон довжин хвиль, $p-i-n$ -діод, втрати пропускання, втрати замикання, час перемикавання.

DOI: 10.15222/TKEA2016.4-5.34
UDC 621.382.062.8

N. F. KARUSHKIN, V. V. MALYSHKO,
V. V. OREKHOVSKY, A. A. TUHARINOV

Ukraine, Kyiv, State enterprise «Research Institute «Orion»,
E-mail: ndiorion@tsua.net

MILLIMETER WAVE $p-i-n$ -DIODE SWITCHING CONTROLLED DEVICES

The paper presents the results of research and development of concentrated type $p-i-n$ -diodes switches providing the switching time at the level of a few nanoseconds. To increase lock losses of (~ 40 dB) the authors use a cascade connection of diodes into waveguide and microstrip transmission line of $\theta = \pi/2$ electric length. Investigation results of creation of switching devices using longitudinally and transversely-distributed $p-i-n$ -structures in the shortwave part of the millimeter wavelength range ($f = 300$ GHz) are presented.

When developing switching devices intended to control the level of microwave power in the millimeter wavelength range, a number of special features arise limiting the achievement of optimal parameters. The dimensions of the metal ceramic packaged $p-i-n$ -diodes and the mounting elements of semiconductor structures become comparable with the wavelength. As a result, package cannot be considered in the calculations and in the design as the capacity of the concentrated type. In our case the diode package is considered in the form of radial line which is able to transform the input impedance of the transmission line to the terminals of the diode structures, and realize high-impedance state (parallel resonance) in the device circuit in the mode of microwave power transmission. Engineering calculations for the given parameters of the silicon mesostructures showed the possibility of creating high-speed devices for switching microwave power with good characteristics. For diode assembling industrial clockwork ruby jewels with high quality of surface finish, strength and appropriate dimensions are applied as dielectric bushings. Suffice it to say that in the frequency range of 150 GHz, we used the bushings with dimensions of external diameter $D = 0.4$ mm and a height of $h = 0.15$ mm.

The switches created provide transient units of nanoseconds, isolation more than 40 dB at relative frequency bandwidth of 30-40%. Evaluating progress in the development of millimeter wavelength devices, it should be noted that at frequencies greater than 200 GHz, the application of the concentrated type diodes is problematic. In this range it would seem to be promising to use bulk semiconductors. In this case surface-oriented $p-i-n$ -structures can be applied as unified elements of the control devices in the shortwave part of the millimeter range, as well as in quasi-optical transmission lines.

Keywords: microwave switch, millimeter wavelength range, pin diode, transmission loss, locking loss, the switching time.

REFERENCES

1. Balyko A.A., Zalyalutdinova O.V., Ol'chev B.M., Yusupova N.I. [$p-i-n$ -diodes switched and attenuators]. *Electron engineering review. Ser. 1. Microwaves electronics*, iss. 7 (1626), 1991, p. 71. (Rus)
2. Makarenko V. [Using a PIN-diode in controlled broadband attenuators]. *Journal Equis, Electronic Components and Systems*, 2012, no. 9, pp. 38-44. (Rus)
3. Usanov D. A., Skripal A. V., Kulikov M. Yu. Microstrip PIN diode microwave switch. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2011, vol. 54, no. 4, pp. 216-218. <http://dx.doi.org/10.3103/S0735272711040078>
4. Inder J. Bahl. *Control components using Si, GaAs, and GaN technologies*. Artech House, 2014, 324 p.
5. Caverly R.H. *Microwave and RF semiconductor control device modeling*. Artech House, 2016, 290 p.
6. Alaverdyan S.A., Bokov S.I., Bulgakov V.O., Zaicev N.A., Isaev V.M., Cabanov I.N., Katushkin Yu.Yu., Komarov V.V., Krenitskii A.P., Meshchanov V.P., Savushkin S.A., Syromyatnikov A.V., Yakunin A.S. [THz frequency range: electron component base, questions of metrological support]. *Electron Engineering Review, Ser. 1, Microwaves electronics, Moscow, CNII "Electronics"*, 2012. (Rus)
7. Karushkin N.F. [Characteristics of high-speed amplitude switches of the inverse-type operating in millimeter wave range]. *Tekhnika i Pribory SVCh*, 2010, no. 1, pp.11-15. (Rus)
8. Armstrong A. Monolithic control components for high power mm-waves. *Microwave Journal*, 1985, no 9, pp. 197-201.
9. Rahm M., Li J.-S., Padilla W.J. THz wave modulators: brief review on different modulation techniques. *Journal of Infrared, Millimeter Wave and Terahertz Waves*, 2013, vol. 34, pp. 1-27.
10. Vaisblat A.V. [*Microwave switching devices on semiconductor diode*]. Moscow, Radio i Sviaz', 1987, 120 p. (Rus)
11. *Waveguide Handbook*. Ed. by N. Marcuvitz. Dover Publications Inc., 1965, 458 p.
12. Karushkin N.F. [Devices for microwave power switching and modulation in millimeter wave band]. *Radiophysics and electronics*, 2004, vol. 9, no 3, pp. 596-602. (Rus)
13. Karushkin N.F., Simonchuk V.I., Malyshko V.V., Orekhovskiy V.I. [Device for control of amplitude and phase of microwave signals in the millimeter wavelength range]. *Tekhnika i Pribory SVCh*, 2008, no. 1, pp. 36-41. (Rus)
14. Dzekhtser G.B., Orlov O.S. $P-i-n$ -diody v shirokopolosnykh ustroystvakh SVCh [$P-i-n$ -diodes in broadband microwave devices]. Moscow, Sovetskoe radio, 1970. (Rus)
15. SVCh-ustroystva na poluprovodnikovyykh diodakh. Proektirovaniye i raschet. [*Microwave devices based on semiconductor diodes. Design and calculation*]. Ed. by I.V. Malskii and B.V. Sestroretskii. Moscow, Sovetskoe radio, 1969. (Rus)
16. Karushkin N.F., Fialkovsky A.T. [Calculation of layered metal-dielectric structures of finite length, located in a rectangular waveguide]. *Izvestiya Vuzov. Radiofizika*, 1976, vol. XIX, no. 8, pp. 1218-1224. (Rus)

В. С. ПОПУКАЙЛО

Республика Молдова, г. Тирасполь, Приднестровский государственный университет
им. Т. Г. Шевченко

E-mail: vsp.science@gmail.com

ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ МАЛОГО ОБЪЕМА

Рассмотрена мощность критериев обнаружения аномальных измерений в зависимости от объема малой выборки. Исследованы и наглядно проиллюстрированы возможности критериев Граббса, Диксона, Титъена—Мура, Ирвина, Шовене, Львовского и Романовского при объеме исследуемых данных от 5 до 20 измерений. Сделаны выводы о возможности применения каждого из критериев для обнаружения аномальных измерений при обработке данных малого объема.

Ключевые слова: малая выборка, грубые ошибки, аномальные измерения, критерии обнаружения выбросов.

Одним из этапов предварительной обработки сигналов является устранение аномальных измерений, которые даже при небольшой частоте их появления могут внести большие погрешности в результаты восстановления сообщений или в оценки их статистических характеристик. В этом контексте аномальными называют значения, резко выделяющиеся по величине и статистическим свойствам из основной группы [1]. Причины возникновения таких аномальных значений, называемых также грубыми ошибками, могут заключаться как в сбое или отказе определенного оборудования, так и в кратковременном повышении допустимого уровня шумов из-за какого-либо внешнего воздействия.

Существует большое количество критериев, предназначенных для решения задачи отсева аномальных измерений из полученной экспериментальным путем информации [2, 3]. Эффективность этих методов во многом зависит от объема исследуемой выборки. На практике часто встречаются ситуации, когда исследуемый входной процесс представляется ограниченным объемом данных, и поэтому нахождение оптимального метода обнаружения аномальных измерений в условиях малого количества исходной информации является актуальной задачей.

В [4] были исследованы возможности 18 критериев обнаружения грубых ошибок и выбраны критерии, наиболее достоверно их обнаруживающие при объеме исходных данных в 10 элементов. Однако, поскольку малыми считаются выборки, содержащие менее 20 элементов [5], целью настоящей работы была проверка полученных результатов на выборках различного объема n — от 5 до 20 элементов.

Для решения поставленной задачи статистический эксперимент проводился по следующему алгоритму.

1. Для каждого из исследуемых значений n с помощью генератора случайных чисел были получены массивы данных, содержащие несколько тысяч выборок с нормальным законом распределения и заданными характеристиками: средними величинами и дисперсиями. При этом среднее значение было принято равным 10 для всех выборок, а величина дисперсии варьировалась от 0,25 до 25.

2. Каждая выборка упорядочивалась по возрастанию, после чего на место максимального элемента добавлялось значение из диапазона $[1\sigma; 5\sigma]$, где σ — известное генеральное среднеквадратическое отклонение (**СКО**), т. е. показатель рассеивания случайной величины.

3. Выборки проверялись на наличие аномальных измерений каждым из 8 исследуемых критериев.

4. Полученные результаты вносились в общую таблицу, далее подсчитывалась доля обнаруженных аномальных измерений для каждого из критериев при выбранном значении σ .

5. Производились анализ и интерпретация полученных результатов.

Из теории математической статистики известно, что значения нормально распределенной случайной величины с вероятностью более 99% лежат в интервале $(\bar{x} - 3\sigma; \bar{x} + 3\sigma)$, где \bar{x} — истинная величина среднего арифметического. При этом в интервале $(\bar{x} - 2\sigma; \bar{x} + 2\sigma)$ находится более 95% значений, а в интервале $(\bar{x} - 1\sigma; \bar{x} + 1\sigma)$ — более 68%. Очевидно, значения выше $\bar{x} + 3\sigma$ с большой вероятностью окажутся аномальными измерениями, в то время как значения менее $\bar{x} + 2\sigma$ таковыми являться не будут.

Критерии обнаружения грубых ошибок, как правило, делятся на две группы:

- методы, используемые при известном генеральном СКО;
- методы, используемые при неизвестном генеральном СКО.

Первая группа методов применяется в тех случаях, когда исследователь обладает сведениями как о функции полезной составляющей сигналов, так и о параметрах распределения шумовой составляющей, что на практике встречается довольно редко. Выборочная же оценка таких параметров по малому числу измерений приводит к высокой погрешности [6]. Так, в качестве базового критерия в ГОСТ Р ИСО 5725-2–2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений» рекомендуется использовать критерий Граббса, значение которого при известном генеральном СКО и будем считать оптимальным.

Рассмотрим критерии, которые подлежали анализу [2, с. 544–553].

1. Критерий Граббса при неизвестном генеральном СКО. Данный критерий основан на оценивании выборочных отклонений — среднего арифметического \bar{x} и среднеквадратического s — и рассчитывается по формуле

$$\tau = \frac{x_n - \bar{x}}{s}.$$

2. Критерий Диксона используется для быстрого выявления аномальных измерений в выборках небольшого объема по отношению размаха и подразмахов. При этом статистиками являются следующие:

— для проверки одного сомнительного наблюдения

$$r_{10} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1};$$

— для проверки одного сомнительного наблюдения независимо от противоположного крайнего наблюдения

$$r_{11} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2};$$

— для проверки одного сомнительного наблюдения независимо от следующего по величине

$$r_{20} = \frac{x_n - x_{n-2}}{x_n - x_1};$$

— для проверки одного сомнительного наблюдения независимо от следующего по величине и крайнего противоположного

$$r_{21} = \frac{x_n - x_{n-2}}{x_n - x_2}.$$

3. Критерий Титъена—Мура является обобщением критерия Граббса в случае выявления нескольких выбросов в выборке. Для выделения k наибольших выбросов используется статистика

$$L_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x}_k)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

$$\text{где } \bar{x}_k = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} x_i.$$

4. Критерий Ирвина. Использование данного критерия также требует выборочной оценки СКО. Значение критерия вычисляется по формуле

$$\tau = \frac{x_n - x_{n-1}}{s}.$$

5. Критерий Шовене. Элемент выборки x_i объема n является аномальным измерением, если вероятность его отклонения от среднего значения не более $1/(12n)$. Значение критерия вычисляется по формуле

$$K = \frac{x_n - \bar{x}}{s}.$$

6. Критерий Львовского используется для нахождения аномальных измерений при малом их числе, при этом в метод максимального относительного отклонения вводится уточняющий коэффициент, зависящий от объема выборки. Значение критерия вычисляется по формуле [7, с. 24]

$$\tau = \frac{x_n - \bar{x}}{s \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}}}.$$

7. Критерий Романовского. Гипотеза о наличии аномальных измерений в подозрительных результатах подтверждается, если выполняется неравенство

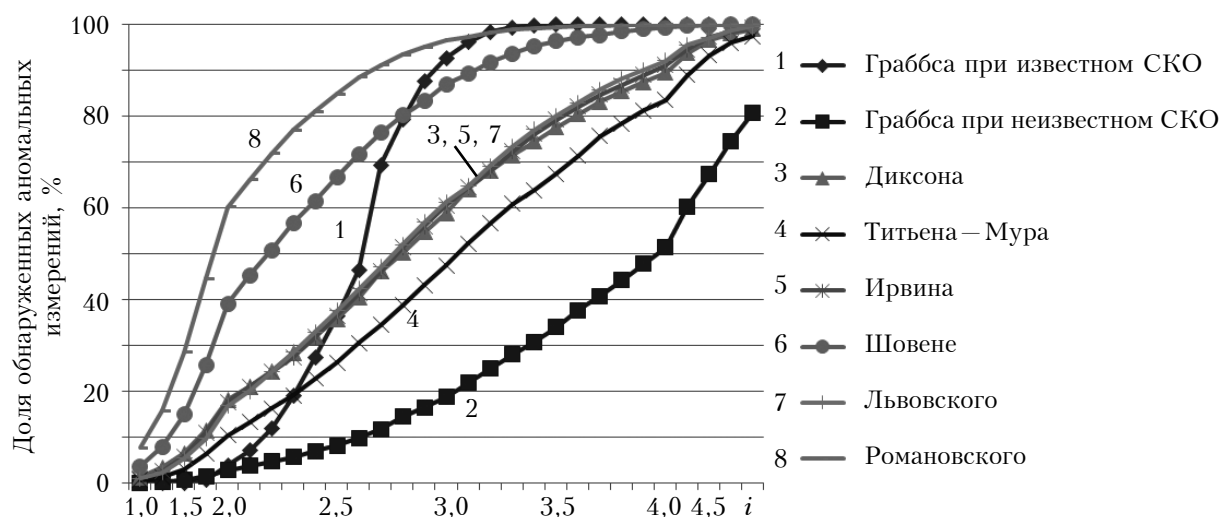
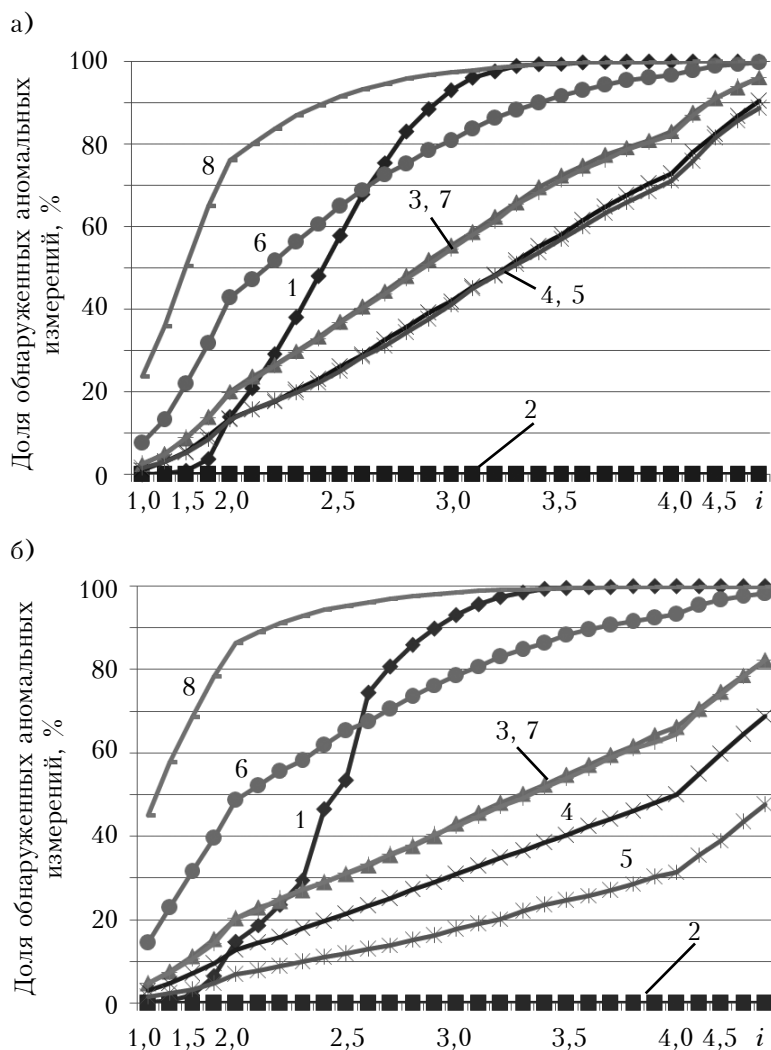
$$|x_i - \bar{x}| \geq t_p s,$$

где t_p — квантиль распределения Стьюдента при заданной доверительной вероятности с числом степеней свободы $k = n - k_n$ (k_n — число подозрительных результатов наблюдений).

Точечные оценки распределения среднего значения и СКО вычисляются без учета подозрительных результатов наблюдений.

В [4] было показано, что в определении грубых ошибок в выборках малого объема лучше всего зарекомендовали себя критерии Диксона, Ирвина, Львовского и Титъена—Мура. Проиллюстрируем это утверждение данными, полученными в ходе статистического эксперимента.

На графике **рис. 1** по оси абсцисс располагаются значения величины i из выражения $\bar{x} + i\sigma$, а по оси ординат — доля обнаруженных аномальных измерений при $n = 10$. Здесь видно, что критерии Диксона, Ирвина и Львовского дают практически одинаковые результаты (с точностью до 1%), и все они могут быть рекомендованы к использованию при данном объеме выборки. Критерий Титъена—Мура обладает пониженной мощностью обнаружения аномальных измерений, однако это компенсируется малым количеством ошибок I рода (так называемая ложная тревога). Остальные критерии

Рис. 1. Мощность критериев обнаружения аномальных измерений при $n = 10$ Рис. 2. Мощность критериев обнаружения аномальных измерений при $n = 7$ (а) и $n = 5$ (б) (обозначения те же, что и на рис. 1)

рии использовать не рекомендуется из-за низкой мощности (критерий Грabbса при неизвестном генеральном СКО) либо большим количеством ошибок I рода (так, критерии Шовене и Романовского считают грубой ошибкой значение $\bar{x} + 2\sigma$ в 39% и 60% случаев соответственно, что не может быть признано удовлетворительным). Таким образом, результаты предыдущего исследования [4] подтверждаются.

Рассмотрим, как изменяется мощность критериев обнаружения аномальных измерений при уменьшении исследуемого объема выборки. На рис. 2, где изображены графики, полученные для $n = 7$ и $n = 5$, видно, что при таких объемах выборки обнаружить аномальные измерения с помощью критерия Грabbса при неизвестном генеральном СКО невозможно. При использовании критериев Шовене и Романовского количество ошибок I рода увеличивается с уменьшением объема выборки (при $n = 7$ критерий Шовене считает значение $\bar{x} + 2\sigma$ аномальным результатом в 42,84% случаев, а критерий Романовского — в 76,08%; при $n = 5$ — соответственно, в 48,76% и в 86,52% случаев), что указывает на зависимость достоверности получаемых результатов от объема выборки. Также из графиков видна прямая зависимость от объема исследуемой выборки мощности критерия Ирвина. Оптимальными для обнаружения аномальных измерений в выборках объемом менее 10 значений можно

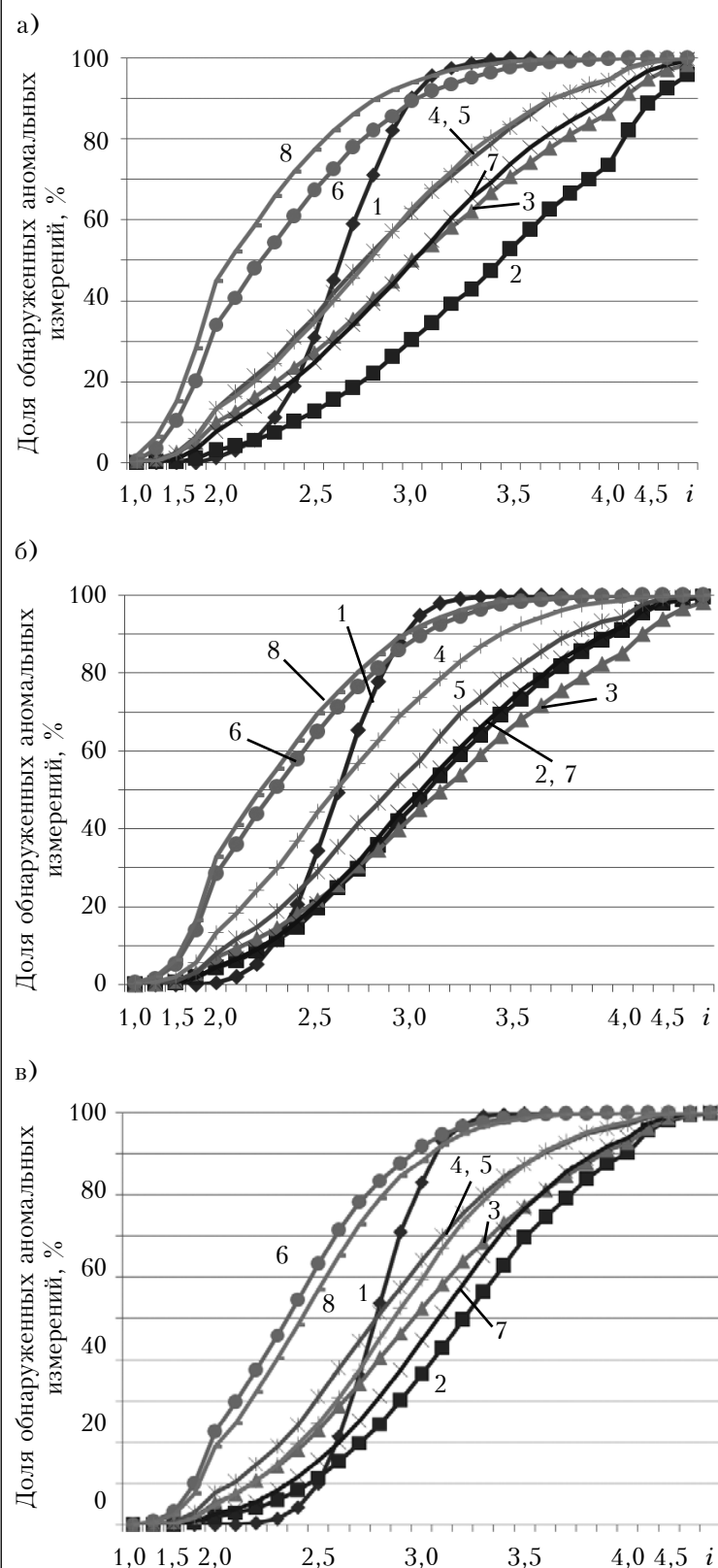


Рис. 3. Мощность критериев обнаружения аномальных измерений при $n = 13$ (а), $n = 16$ (б) и $n = 20$ (в)

1 — Граббса при известном СКО; 2 — Граббса при неизвестном СКО; 3 — Диксона; 4 — Титьена—Мура; 5 — Ирвина; 6 — Шовене; 7 — Львовского; 8 — Романовского

считать критерии Диксона и Львовского, которые дают статистически неразличимые результаты.

Теперь рассмотрим, как изменяется мощность критериев обнаружения аномальных результатов при увеличении исследуемого объема выборки. Как видно из графиков на рис. 3, полученные для $n = 13, 16, 20$, наилучшие результаты по обнаружению аномальных измерений в выборках при $n > 10$ показывают критерии Ирвина и Львовского. Следует отметить, что при увеличении объемов исследуемых данных возрастает точность критерия Граббса при неизвестном СКО и значительно уменьшается количество ошибок I рода у критериев Шовене и Романовского.

Выводы

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Оптимальным для обнаружения аномальных измерений является критерий Львовского, который дает приемлемые результаты даже в случае малого количества исходной информации, т. е. вне зависимости от объема данных (это связано с использованием поправочного коэффициента, зависящего от величины выборки), и при этом его точность возрастает с увеличением количества исследуемой информации.

2. Критерий Диксона можно рекомендовать при обработке выборок с объемом не более 10, поскольку он прост в расчетах, а его результаты статистически неотличимы от критерия Львовского. При этом следует обратить внимание, что для объемов выборок больше 10 исследовалась мощность статистик Диксона для проверки одного сомнительного наблюдения независимо от следующего по величине, как это рекомендуется в [2, с. 550]. Направлением дальнейших исследований может быть проверка данных рекомендаций и изучение мощности различных критериев Диксона в зависимости от объема выборки.

3. Мощность критерия Ирвина прямо зависит от объема выборки. Это связано с использованием величины выборочной дисперсии, которая при малом объеме выборки не отражает достоверно величину дисперсии генеральной совокупности. Однако критерий Ирвина можно применять для выборок объемом не менее 10.

4. Критерий Титьена—Мура может быть рекомендован для обнаружения аномальных значений в малых выборках (больше 5), поскольку он довольно хорошо распознает ошибки в значе-

ниях более $\bar{x}+4\sigma$ и обладает наименьшим количеством ошибок I рода.

5. Критерий Граббса при неизвестном генеральном среднеквадратическом отклонении можно применять при объемах выборки не менее 15.

6. Критерии Шовене и Романовского не рекомендуется применять при объеме исследуемых данных менее 20.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Марчук В. И., Токарева С. В. Способы обнаружения аномальных значений при анализе нестационарных случайных процессов. — Шахты: ЮРГУЭС, 2009.

2. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012.

3. Charu C. Aggarwal. Outlier Analysis. — NY: Springer, 2013.

4. Попукайло В. С. Исследование критериев грубых ошибок применительно к выборкам малого объема // Радиотехника и компьютерные системы. — 2015. — № 3(73). — С. 39–44.

5. Столяренко Ю. А. Контроль кристаллов интегральных схем на основе статистического моделирования методом точечных распределений / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: ГУП НПП «СПУРТ», 2006.

6. Громыко Г. Л. Теория статистики. — М.: ИНФРА-М, 2005.

7. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: учеб. пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 1988.

Дата поступления рукописи
в редакцию 27.04 2016 г.

В.С. ПОПУКАЙЛО

Республика Молдова, м. Тирасполь, Приднестровский державний университет ім. Т. Г. Шевченка
E-mail: vsp.science@gmail.com

ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ ОБРОБЦІ ДАНИХ МАЛОГО ОБСЯГУ

Розглянуто потужність критеріїв виявлення аномальних вимірювань в залежності від обсягу малої вибірки. Досліджено та наочно проілюстровано можливості критеріїв Граббса, Діксона, Тіт'єна—Мура, Ірвіна, Шовене, Львівського та Романовського при обсягах досліджуваних даних від 5 до 20 вимірювань. Зроблено висновки про можливість застосування кожного з критеріїв для виявлення аномальних вимірювань при обробці даних малого обсягу.

Ключові слова: мала вибірка, грубі помилки, аномальні вимірювання, критерії виявлення викидів.

DOI: 10.15222/TKEA2016.4-5.42

UDC 519.25

V. S. POPUKAYLO

Republic of Moldova, Tiraspol, Taras Shevchenko Transnistria State University
E-mail: vsp.science@gmail.com

DETECTION OF OUTLIERS IN PROCESSING OF SMALL SIZE DATA

This article describes the criteria for detection of outliers power depending on a small size sample. Removing outliers is one of the stages of signals pre-processing. Statistical experiment, in which using a random number generator were received arrays of data, containing several thousand samples with normal distribution, with the given mean averages and standard deviation for each n -value, was conducted to solve this problem. Thus, we researched and vividly illustrated the possibility of Grubbs, Dixon, Tietjen—Moore, Irving, Chauvenet, Lvovsky and Romanovsky criteria at studied data sizes from 5 to 20 meterages. Conclusions about the applicability of each criterion for the outliers detection in processing of small size data were made. Lvovsky criterion was recognized the optimal criterion. Dixon's criterion was recommended for $n \leq 10$. Irwin's criterion was recommended when $n \geq 10$. Tietjen—Moore's criterion can be recommended for the detection of outliers in small samples for $n > 5$, since it recognizes errors well in the values of a $\bar{x}+4\sigma$ and has the least amount of I type mistakes. Grubb's with an unknown standard deviation may be used in samples for $n \geq 15$. Chauvenet and Romanovsky criteria cannot be recommended for the detection of outliers in small size data.

Keywords: small size data, outlier detection criteria, anomalous meterages, outlier analysis.

REFERENCES

1. Marchuk V. I., Tokareva S. V. *Sposoby obnaruzheniya anomalnykh znachenii pri analize nestatsionarnykh sluchainykh protsessov* [Methods for detection of outliers in the analysis of non-stationary random processes]. Shakhty, SRSUES, 2009. (Rus)

2. Kobzar' A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnykh* [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moscow, FIZMATLIT, 2012. (Rus)

3. Charu C. Aggarwal. *Outlier Analysis*. NY, Springer, 2013, 446 p.

4. Popukailo V. S. [The outlier criteria research in relation to small volume samples]. *Radioelektronni i komp'yuterni sistemi*, 2015, 3(73), pp. 39-44. (Rus)

5. Stolyarenko Yu. A. [The crystals control of integrated schemes on the basis of statistical modeling by pointed distributions method]. Extended abstract of dissertation... Ph.D. in Engineering Science. Moscow, SUE NPTs "SPURT", 2006. (Rus)

6. Gromyko G. L. *Teoriya statistiki* [Theory of Statistics]. Moscow, INFRA-M, 2011, 476 p. (Rus)

7. Lvovskii E. N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul: ucheb. posobie dlya vuzov* [Statistical methods for constructing empirical formulas: a textbook for high schools]. Moscow, Vysshaya shkola, 1988.

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, д. т. н. И. П. ОСТРОВСКИЙ,
к. т. н. Ю. Н. ХОВЕРКО, к. т. н. Р. Н. КОРЕЦКИЙ

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОВОДИМОСТИ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СЕНСОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Исследована частотная зависимость активного сопротивления нитевидных кристаллов кремния, легированных бором в разной концентрации, соответствующей диэлектрической стороне перехода «металл — диэлектрик», в температурном интервале 4,2–100 К. На основе анализа полученных характеристик установлены и изучены особенности механизма переноса носителей заряда в нитевидных кристаллах Si в области низких частот. Разработан тензорезистор, работоспособный при криогенных температурах и обеспечивающий точность измерения температуры до 0,1 К.

Ключевые слова: микрокристалл, частота, проводимость, сенсор, криогенная температура.

Как известно, измерение частотной зависимости импеданса является одним из важных методов получения информации о механизмах проводимости в полупроводниковых материалах [1–4], особенно в области низких температур [5, 6]. С понижением температуры ионизационные процессы в полупроводниках становятся невозможными, носители заряда в зоне проводимости вымораживаются, концентрация их становится настолько малой, что доминирующий вклад в электрический ток начинают вносить прыжки электронов непосредственно по примесям, что происходит за счет малого, но конечного перекрытия волновых функций соседних примесей [7, 8]. Характерной особенностью транспорта носителей заряда для локализованных примесных уровней является увеличение проводимости с ростом частоты, которое в большинстве случаев описывается степенной зависимостью в широком диапазоне частот. Для многих неупорядоченных материалов (аморфные и легированные полупроводники, полупроводниковые стекла, проводящие полимеры, гранулированные проводники и т. п.) частотная зависимость действительной части проводимости имеет степенной характер с показателем степени s [7], а для полупроводников s зависит от частоты: как правило, в низкочастотной области $0 < s < 1$, в области высоких частот $s > 1$ [9–11]. Для объяснения такого поведения частотной зависимости проводимости полупроводников требуется информация о конкретных особенностях механизма переноса в неупорядоченных материалах.

Целью настоящей работы было исследование частотных зависимостей активного сопротивления нитевидных кристаллов кремния с концентрацией легирующей примеси, соответствующей диэлектрической стороне фазового перехода

да «металл — диэлектрик», изучение особенностей механизмов переноса в кристаллах, а также создание сенсора температуры на их основе.

Методика эксперимента

Нитевидные кристаллы (НК) кремния выращивались методом химических транспортных реакций в закрытой бромидной системе с использованием бора как легирующей примеси и золота как инициатора роста. Концентрация примесей в кристаллах изменялась в диапазоне $(2–5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что соответствует сериям образцов с удельным сопротивлением $\rho_{300\text{K}} = 0,0168–0,0143 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и относится к диэлектрической стороне перехода «металл — диэлектрик», где температурная зависимость сопротивления носит полупроводниковый характер. Контакты к кристаллам были созданы методом дуговой сварки платиновой микропроволоки диаметром $15 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Частотные зависимости активного сопротивления НК Si измерялись с помощью прибора Lockin в диапазоне от 0,01 Гц до 250 кГц при фиксированных значениях температуры в интервале 4,2–100 К.

Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены зависимости активного сопротивления Z' образцов с концентрацией примесей $2 \cdot 10^{18}$ и $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Здесь видно, что Z' зависит и от частоты ω , и от температуры T . При понижении температуры активное сопротивление исследованных образцов возрастает, что обусловлено вымораживанием носителей заряда.

Что касается зависимости активного сопротивления от частоты, то для каждого образца, в зависимости от степени легирования, существует низкотемпературный интервал, в котором при повышении частоты от 0 до 250 кГц значение Z' уменьшается почти в два раза, несмотря

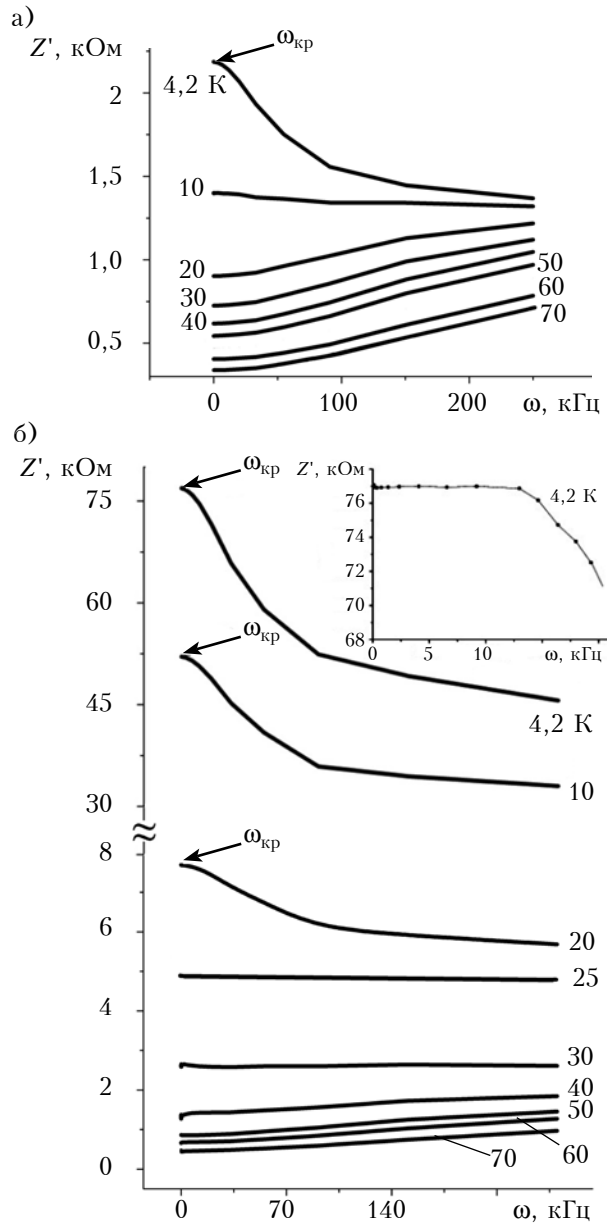


Рис. 1. Частотная зависимость действительной части сопротивления образцов НК Si с удельным сопротивлением $\rho_{300\text{K}}=0,0143$ Ом·см (а) и $\rho_{300\text{K}}=0,0168$ Ом·см (б) при различных значениях температуры (в К) (на вставке приведена часть кривой для 4,2 К в частотном диапазоне 0–20 кГц)

на значительное вымораживание носителей заряда. При этом Z' остается практически неизменным при повышении частоты до некоторого критического значения $\omega_{\text{кр}}$, которое соответствует началу прыжковой проводимости (проявляется в данных образцах при низких температурах как на постоянном, так и на переменном токе [12, 13]).

Для образцов НК Si с $\rho_{300\text{K}} = 0,0143$ Ом·см (рис. 1, а) такой эффект наблюдается лишь при гелиевой температуре. При 10 К активное сопротивление образца практически не зависит от ча-

стоты во всем исследованном диапазоне, а при более высоких температурах увеличение частоты от 0 до 250 кГц приводит к росту Z' примерно в 1,5 раза.

Для образцов с $\rho_{300\text{K}} = 0,0155$ Ом·см при понижении температуры наблюдается значительно больший рост активного сопротивления. Кроме того, эффект уменьшения Z' после достижения частотой значения $\omega_{\text{кр}}$ проявляется уже в интервале $T = 4,2 - 20$ К, в котором величина Z' начинает уменьшаться. При $T \approx 20$ К частотная зависимость активного сопротивления образцов становится уже достаточно слабой, а дальнейшее повышение температуры приводит к росту Z' с увеличением частоты.

В образцах с $\rho_{300\text{K}} = 0,0168$ Ом·см (рис. 1, б) наблюдается значительное увеличение активного сопротивления с понижением температуры до 4,2 К, а температурный интервал, в котором величина Z' начинает уменьшаться после достижения $\omega_{\text{кр}}$, расширяется до 25 К.

Таким образом, очевидна зависимость активного сопротивления не только от частоты тока, но и от концентрации легирующей примеси. Для иллюстрации данных закономерностей были построены графики зависимости критической частоты от удельного сопротивления при разных температурах.

Как видно из рис. 2, при фиксированной температуре исследуемых образцов НК Si в диапазоне 4,2–20 К увеличение удельного сопротивления приводит к линейному уменьшению частоты начала прыжковой проводимости $\omega_{\text{кр}}$, а увеличение температуры образца — к росту $\omega_{\text{кр}}$.

Поскольку в данных образцах НК Si при низких температурах основным механизмом переноса носителей заряда является прыжковая проводимость, величина и характер которой зависят от частоты тока [7], необходимо более детально проанализировать полученные результаты. Для примера рассмотрим частотные зависимости активного сопротивления образца

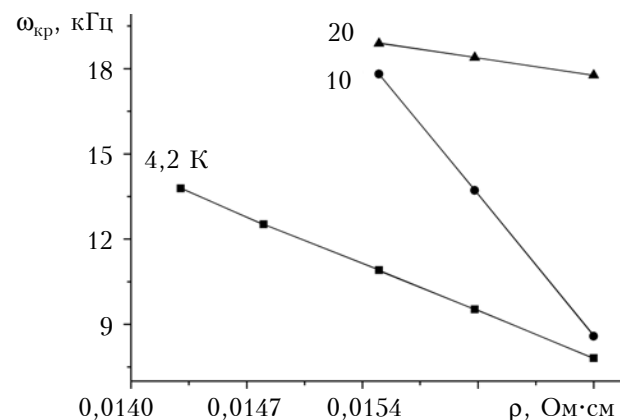


Рис. 2. Зависимость частоты начала прыжковой проводимости от удельного сопротивления образцов НК Si при различных температурах

с $\rho_{300\text{K}} = 0,0168 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ в интервале $T = 4,2 - 20 \text{ К}$ (рис. 1, б). Их степенной характер указывает на прыжковый механизм проводимости, который, к тому же, обычно связывается с прыжками носителей заряда по локализованным состояниям с участием фононов (релаксационная проводимость) [7, 14, 15]. Близкая к линейной зависимость Z' от ω , которая наблюдается при низких частотах, описывается теорией низкотемпературной прыжковой проводимости при учете кулоновских корреляций локализованных носителей [16].

В [9, 10] линейность частотной зависимости низкотемпературной проводимости неупорядоченных полупроводников в области частот, меньших, чем частота начала бесфононной проводимости, интерпретируется как непосредственное проявление существования кулоновской щели. При одночастичной плотности состояний такая щель описывает распределение самосогласованных энергий взаимодействующих локализованных носителей заряда в основном состоянии системы. Действительно, в области промежуточных частот прыжковая проводимость определяется электронными переходами на дальние расстояния, и при этом, вообще-то говоря, следует учитывать кулоновское взаимодействие дальнего действия, обуславливающее появление кулоновской щели в одночастичной плотности состояний в окрестности уровня Ферми [17, 18].

Для экспериментального подтверждения существования кулоновской щели был использован метод исследования прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка, которая оказывается чрезвычайно чувствительной к плотности состояний в окрестности уровня Ферми [19]. Образование кулоновской щели принято связывать с проявлением прыжковой проводимости Эфроса — Шкловского, что описывается следующей формулой:

$$\rho(T) \propto \rho_0 \exp \sqrt{\frac{T_1}{T}}, \quad (1)$$

где $T_1 = \beta_1 e_2 / (\chi \alpha)$;
 $\beta_1 = 2,7$;
 χ — диэлектрическая проницаемость среды;
 α — радиус локализации электрона.

Для подтверждения наличия кулоновской щели проанализируем представленную в полупрологическом координатах на рис. 3 температурную зависимость удельного сопротивления кристаллов с концентрацией, соответствующей диэлектрической стороне перехода «металл — диэлектрик». Из рисунка видно, что характер зависимости удельного сопротивления от температуры — линейный, что соответствует формуле (1), а значит, закон Эфроса — Шкловского выполняется.

При расчете прыжковой проводимости в области частот, где она проявляется, использовалось уравнение

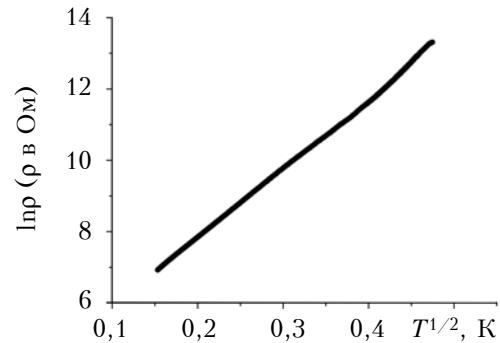


Рис. 3. Температурная зависимость проводимости для образца НК Si с $\rho_{300\text{K}} = 0,0168 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

$$kT \ll [U(r_\omega) = e_2 / (\chi r_\omega)] \ll \Delta, \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана;

e — заряд носителя проводимости;

Δ — ширина кулоновской щели;

r_ω — межцентровое расстояние в парах, которые дают основной вклад в релаксационную проводимость.

Приближенная оценка ширины кулоновской щели согласно уравнению (2) дает значение порядка нескольких мэВ. Эта величина оказывается соизмеримой с энергией активации прыжковой проводимости в образцах, полученной из температурной зависимости сопротивления на рис. 3 и равной примерно 2,3 мэВ.

Таким образом, можно утверждать, что характер полученных частотных зависимостей проводимости нитевидных кристаллов кремния обусловлен тем, что при низких температурах основным механизмом переноса носителей заряда является прыжковая проводимость, инициируемая переменным током с частотой $\omega_{\text{кр}}$. В зависимости от концентрации легирующей примеси величина $\omega_{\text{кр}}$ меняется в пределах от 8 до 20 кГц.

На основании проведенных исследований нами разработан сенсор температуры, принцип действия которого основан на изменении сопротивления при изменении температуры. Учитывая особенности полученных частотных зависимостей, тензорезистор был сконструирован на основе НК Si с удельным сопротивлением $\rho_{300\text{K}} = 0,0168 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, что обеспечило его работоспособность при криогенных температурах (рис. 4). Температурный коэффициент электрического сопротивления (ТКС) сенсора в интервале 4,2 — 100 К составляет приблизительно $0,1 \text{ К}^{-1}$.

На основе частотных зависимостей сопротивления был определен оптимальный частотный диапазон работы сенсора с целью обеспечения его стабильной работы с заданным ТКС и устранения влияния кулоновской щели на его выходные характеристики — от 1 до 8 кГц. Исследования показали, что предложенный сенсор может измерять абсолютную температуру с точностью 0,1 К. Инерционность датчика при измерении температуры составляет не более 60 мс.

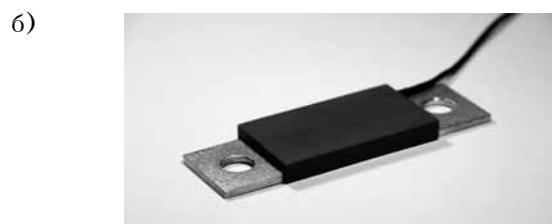
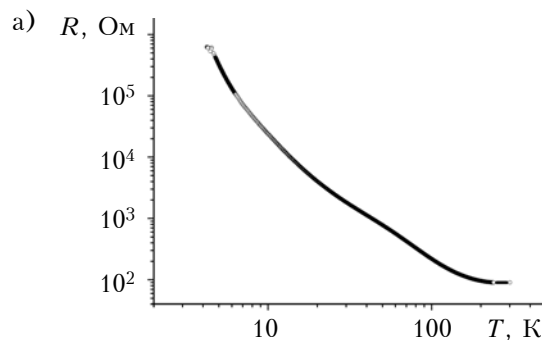


Рис. 4. Температурная зависимость изменения сопротивления (а) разработанного тензорезистора (б) на основе НК Si с $\rho_{300K}=0,0168 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

Предложенный вариант сенсора работоспособен в условиях переменного тока, поскольку в этом случае отсутствует саморазогрев чувствительного элемента, а также «паразитные» термо-эдс, что в свою очередь влияет на точность измерения температуры.

Выводы

Таким образом, исследования нитевидных кристаллов кремния, легированных бором, показали, что в области низких температур (4,2–100 К) при частоте от 0 до 250 кГц на их активное сопротивление влияет концентрация примеси. При этом полученные результаты указывают на то, что в области температур 4,2–20 К при частоте от 8 до 20 кГц, в зависимости от степени легирования (удельного сопротивления), в исследованных образцах реализуется прыжковая проводимость с участием фононов, что приводит к существенному снижению величины Z'' при повышении частоты до 250 кГц. Уменьшение концентрации легирующей примеси смещает частоту начала прыжковой проводимости в диапазон более низких частот, что связано с проявлением кулоновской щели.

Установленные тензометрические характеристики микрокристаллов Si позволили разработать высокочувствительный температурный сенсор, работоспособный в интервале от 4,2 до 100 К с точностью измерения температуры до 0,1 К.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pollak M. Approximations for the ac Impurity Hopping Conduction // *Phys. Rev.* — 1964. — A564. — P. 133. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.133.A564>.
2. Dyre J.C., Schroder T.B. Universality of ac conduction in disordered solids // *Rev. Mod. Phys.* — 2000. — Vol. 72. — P. 873. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.72.873>

3. Zvyagin I.P. Charge transport via delocalized states in disordered materials // In book: *Charge Transport in Disordered Solids with Applications in Electronics* / Ed. by Baranovski S. — John Wiley & Sons, Chichester, 2006. — 498 p.
4. Druzhinin A., Ostrovskii I., Kogut I. et al. Magneto-transport properties of poly-silicon in SOI structures at low temperatures // *Materials Science in Semiconductor Processing*. — 2015. — Vol. 31. — P. 19–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2014.11.014>
5. Sybous S., Kaaouachi A. El., Narjis A. et al. Study of variable range hopping conduction in insulating n-type InSb semiconductor at very low temperature // *ICMC AIP Conf. Proc.* — 2012. — Vol. 1435. — P. 377–384. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.4712119>
6. Kaaouachi A. El. Screening and variable range hopping conduction in silicon MOSFETs at very low temperature // *Chinese Journal of Physics*. — Vol. 51, N 6. — 2013. — P.1312 – 1320. <http://dx.doi.org/10.6122/CJP.51.1312>
7. Pollak M., Geballe T.H. Low-frequency conductivity due to hopping processes in silicon // *Phys. Rev.* — 1961. — Vol.122. — P. 1742. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.122.1742>
8. Druzhinin A., Khoverko Yu., Kogut I., Koretskii R. Properties of low-dimensional polysilicon in SOI structures for low temperature sensors // *Advanced Materials Research*. — 2014. — Vol. 854. — P. 49–55. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.854.49>
9. Ritz E., Dressel M. Influence of electronic correlations on the frequency-dependent hopping transport in Si:P // *Phys. Status Solidi C*. — 2008. — Vol. 5. — P. 703. <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200777583>
10. Hering M., Scheffler, Dressel M., Lohneysen H.V. Signature of electronic correlations in the optical conductivity of the doped semiconductor Si:P // *Phys. Rev. B*. — 2007. — Vol. 75. — P. 205–203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.205203>
11. Helgren E., Armitage N.P., Gruner G. Frequency-dependent conductivity of electron glasses // *Phys. Rev. B*. — 2004. — Vol. 69. — P. 014–201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.014201>
12. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Koretskii R. Strain-induced effects in p-type Si whiskers at low temperatures // *Materials Science in Semiconductor Processing*. — Vol. 40. — 2015. — P. 766–771. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.015>
13. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu. et al. Variable-range hopping conductance in Si whiskers // *Phys. Status Solidi A*. — 2014. — Vol. 211, N 2. — P. 504–508. <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201300162>
14. Austin I.G., Mott N.F. Polarons in crystalline and non-crystalline materials // *Adv. Phys.* — 1969. — Vol.18. — P. 41. <http://dx.doi.org/10.1080/00018736900101267>
15. Efros A.L. On the theory of a.c. conductivity in amorphous semiconductors // *Phil. Mag. B*. — 1981. — Vol. 43. — P. 829. <http://dx.doi.org/10.1080/01418638108222349>
16. Shklovskii B.I., Efros A.L. Zero-phonon ac hopping conductivity of disordered systems // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 1981. — Vol. 54, № 1. — P. 218–222.
17. Mott N.F. Conduction in non-crystalline systems IV. Anderson localization in a disordered lattice // *Phil. Mag.* — 1970. — Vol. 22. — P. 7–29. <http://dx.doi.org/10.1080/14786437008228147>
18. Efros A.L., Shklovskii B.I. Coulomb gap and low temperature conductivity of disordered systems // *J. Phys. C:Sol. St. Phys.* — 1975. — Vol. 8. — P. 49. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3719/8/4/003>
19. Забродский А.Г. Кулоновская щель и фазовый переход металл-изолятор в легированных полупроводниках // *Успехи физ. наук*. — 1998. — Т.168, №7. — С.804–808. <http://dx.doi.org/10.3367/UFNr.0168.199807h.0804>

Дата поступления рукописи
в редакцию 06.06 2016 г.

А. А. ДРУЖИНІН, І. П. ОСТРОВСЬКИЙ,
Ю. Н. ХОВЕРКО, Р. Н. КОРЕЦЬКИЙ

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ПРОВІДНОСТІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ ПРИ КРІОГЕННИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ЇХ ОСНОВІ

Дослідження особливостей низькотемпературної провідності напівпровідникових ниткоподібних кристалів (НК) кремнію відіграють значну роль при розробці електронних приладів, зокрема сенсорів температури.

Результати досліджень активної складової імпедансу Z' НК кремнію, отримані при кріогенних температурах, вказують на її збільшення при зниженні температури і частотну залежність в діапазоні від 0 до 250 кГц. При цьому встановлено, що в температурному діапазоні 4,2–20 К при частоті $\omega_{кр}$, яка може дорівнювати від 8 до 20 кГц в залежності від питомого опору та температури, в зразках реалізується стрибкова провідність за участю фононів, що призводить до суттєвого зниження величини Z' при підвищенні частоти до 250 кГц. Наприклад, при температурі 4,2 К для зразка з питомим опором $\rho_{300K} = 0,0168$ Ом·см частота $\omega_{кр}$ дорівнює 8 кГц, і в діапазоні до 250 кГц активна складова імпедансу знижується майже вдвічі. Така загальна поведінка частотної характеристики зразка зберігається аж до 20 К, при 25 К величина Z' практично не залежить від частоти, а при більш високих температурах при підвищенні частоти вона несуттєво зростає. Зменшення питомого опору зразків призводить до звуження температурного інтервалу, в якому реалізується стрибкова провідність, і при $\rho_{300K} = 0,0143$ Ом·см вона спостерігається тільки в області гелієвої температури.

Зсув частоти початку стрибкової провідності $\omega_{кр}$ від 8 до 20 кГц, в залежності як від температури, так і від величини питомого опору досліджуваних кристалів кремнію, пов'язаний зі зміною концентрації вільних носіїв заряду в зразках, оскільки саме вона обумовлює вплив кулонівської щільності на $\omega_{кр}$.

Експериментальні дослідження низькотемпературної провідності ниткоподібних кристалів кремнію дозволили запропонувати працездатний в інтервалі 4,2–100 К сенсор температури. Сенсор працює на змінному струмі, оскільки це дозволяє уникнути саморозігріву чутливого елемента, а також виникнення «паразитних» термо-ерс, що теж впливає на точність вимірювання температури.

Ключові слова: мікрокристал, частота, провідність, сенсор, кріогенна температура.

DOI: 10.15222/TKEA2016.4-5.47
UDC 621.315.592

A. A. DRUZHININ, I. P. OSTROVSKY,
Yu. N. KHOVERKO, R. N. KORETSKY

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

A STUDY OF THE FREQUENCY DEPENDENCE OF CONDUCTIVITY OF SILICON WHISKERS AT CRYOGENIC TEMPERATURES AS BASIS FOR THE TEMPERATURE SENSORS

Studies of low-temperature features of semiconductor silicon whisker conductivity play a significant role in the development of electronic devices, such as temperature sensors.

The results of studies of the active component of impedance Z' for silicon whiskers obtained at cryogenic temperatures, indicating the increase of its value under temperature decreasing, and showing the frequency dependence in the range from 0 to 250 kHz. It was found that in temperature range 4.2–20 K at a frequency $\omega_{кр}$ which can amount from 8 to 20 kHz, depending on resistivity and temperature, the hopping conduction with the participation of phonons is observed in whisker samples, resulting in a significant reduction of Z' value at frequencies up to 250 kHz. For example, at a temperature of 4.2 K for the sample with resistivity $\rho_{300K}=0.0168$ Ohm·cm the frequency $\omega_{кр}$ is equal to 8 kHz, and in frequency range up to 250 kHz the active component of impedance is reduced approximately by half. Such behavior of the frequency response for these samples is kept up to 20 K, whereas at 25 K the value of Z' is almost independent of frequency, and at higher temperatures with the increasing of frequency, it slightly increases. Reducing the resistivity of the samples leads to a narrowing of the temperature range, where the hopping conduction is observed, and at $\rho_{300K} = 0.0143$ Ohm·cm it is observed only at a helium temperature.

Offset of the frequency ω_{kp} from 8 to 20 kHz at the hopping conduction beginning, depending on temperature and the value of resistivity for studied silicon crystals, can be attributed to the change of free charge carriers concentration in such samples, because it determines the effect of Coulomb gap on ω_{kp} .

Experimental study of low-temperature conductivity of silicon whiskers allowed proposing the temperature sensor operable at temperature range 4.2–100 K. The sensor works on alternating current, because it avoids the self-heating of sensitive element and the occurrence of «parasitic» thermopower, which also affects the accuracy of temperature measurement.

Key words: microcrystal, frequency, conductivity, sensor, cryogenic temperature.

REFERENCES

1. Pollak M. Approximations for the ac Impurity Hopping Conduction. Phys. Rev., 1964, A564, pp. 133. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.133.A564>.
2. Dyre J.C., Schroder T.B. Universality of ac conduction in disordered solids. Rev. Mod. Phys., 2000, vol. 72, pp. 873. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.72.873>
3. Zvyagin I.P. Charge transport via delocalized states in disordered materials. In book: Charge Transport in Disordered Solids with Applications in Electronics. Ed. by Baranovski S., John Wiley & Sons, Chichester, 2006, 498 p.
4. Druzhinin A., Ostrovskii I., Kogut I., Khoverko Yu., Koretskii R., Kogut Iu. Magneto-transport properties of poly-silicon in SOI structures at low temperatures. Materials Science in Semiconductor Processing, 2015, vol. 31, pp. 19-26. Vol. 31. — P. 19–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2014.11.014>
5. Sybous S., Kaaouachi A. El., Narjis A., Limouny L., Dlimi S. Study of variable range hopping conduction in insulating n-type InSb semiconductor at very low temperature. ICMC AIP Conf. Proc., 2012, vol. 1435, pp. 377-384. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4712119>
6. Kaaouachi A. El. Screening and variable range hopping conduction in silicon MOSFETs at very low temperature. Chinese Journal of Physics, vol. 51, no 6, 2013, pp. 1312-1320. <http://dx.doi.org/10.6122/CJP.51.1312>
7. Pollak M., Geballe T.H. Low-frequency conductivity due to hopping processes in silicon. Phys. Rev., 1961, vol.122, pp. 1742. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.122.1742>
8. Druzhinin A., Khoverko Yu., Kogut I., Koretskii R. Properties of low-dimensional polysilicon in SOI structures for low temperature sensors. Advanced Materials Research, 2014, vol. 854, pp. 49-55. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.854.49>
9. Ritz E., Dressel M. Influence of electronic correlations on the frequency-dependent hopping transport in Si:P. Phys. Status Solidi C., 2008, vol. 5, pp. 703. <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200777583>
10. Hering M., Scheffler, Dressel M., Lohneysen H.V. Signature of electronic correlations in the optical conductivity of the doped semiconductor Si:P. Phys. Rev. B., 2007, vol. 75, pp. 205-203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.205203>
11. Helgren E., Armitage N.P., Gruner G. Frequency-dependent conductivity of electron glasses. Phys. Rev. B., 2004, vol. 69, pp. 014-201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.014201>
12. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Koretskii R. Strain-induced effects in p-type Si whiskers at low temperatures. Materials Science in Semiconductor Processing, vol. 40, 2015, pp. 766-771. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.015>
13. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Nichkalo S., Koretskyy R., Kogut Iu. Variable-range hopping conductance in Si whiskers. Phys. Status Solidi A., 2014, vol. 211, no 2, pp. 504-508. <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201300162>
14. Austin I.G., Mott N.F. Polarons in crystalline and non-crystalline materials. Adv. Phys., 1969, vol.18, pp. 41. <http://dx.doi.org/10.1080/00018736900101267>
15. Efros A.L. On the theory of a.c. conductivity in amorphous semiconductors. Phil. Mag. B, 1981, vol. 43, pp. 829. <http://dx.doi.org/10.1080/01418638108222349>
16. Shklovskii B.I., Efros A.L. Zero-phonon ac hopping conductivity of disordered systems. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 1981, vol. 54, no 1, p. 218-222.
17. Mott N.F. Conduction in non-Crystalline systems IV. Anderson localization in a disordered. Phil. Mag., 1970, vol. 22, pp. 7-29. <http://dx.doi.org/10.1080/14786437008228147>
18. Efros A.L., Shklovskii B.I. Coulomb gap and low temperature conductivity of disordered systems. J. Phys. C:Sol. St. Phys., 1975, vol. 8, p. 49. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3719/8/4/003>
19. Zabrodskii A.G. Coulomb gap and metal-insulator transitions in doped semiconductors. Phys. Usp. 41 722–726 (1998). <http://dx.doi.org/10.1070/PU1998v041n07ABEH000422>

К. т. н. В. П. СИДОРЕНКО¹, Ю. В. ПРОКОФЬЕВ¹, Д. С. МУРЧЕНКО¹, В. М. ЕРЕМЕНКО²,
А. В. ШЕЛЕХОВ²

Украина, г. Киев, ¹НИИ микроприборов НАНУ; г. Сумы, ²Институт прикладной физики НАНУ
E-mail: sidorenko@imd.org.ua

КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ

Разработан, изготовлен и исследован координатно-чувствительный детектор заряженных частиц для спектроскопии, который может использоваться в аналитической аппаратуре, обеспечивая одновременный анализ всего элементного состава материалов с высокой чувствительностью и точностью. Детектор построен на основе разработанной специализированной большой интегральной схемы и микроканальных пластин.

Ключевые слова: координатно-чувствительный детектор, спектроскопия, элементный анализ, большая интегральная схема, микроканальная пластина.

Создание координатно-чувствительных детекторов (**КЧД**) заряженных частиц для спектроскопии является актуальной задачей для создания современной аналитической аппаратуры, предназначенной для количественного анализа многоэлементных веществ [1–6]. Применяемые в настоящее время метод фоторегистрации и метод последовательного измерения по каждому каналу с применением цилиндров Фарадея являются медленными и затратными и не дают возможности проводить анализ в масштабе реального времени. Приборы, с помощью которых можно одновременно получать информацию про весь элементный состав путем анализа спектра в масштабе реального времени и с высокой точностью без специальной подготовки проб, позволяют оперативно управлять процессом анализа, проводя юстировку масс-спектрометра по конкретным изотопам примесных элементов. Вследствие этого увеличивается точность и чувствительность анализа, значительно сокращается время анализа и затраты исследуемого материала, что особенно важно при создании наноматериалов, получении сверхчистых материалов.

На основе разработанной нами специализированной большой интегральной схемы [7, 8] и микроканальных пластин создан координатно-чувствительный детектор заряженных частиц, описанию которого посвящена данная статья.

Основные узлы и технические характеристики КЧД

Основными функциональными узлами разработанного детектора являются следующие:

- входная апертурная щель, выбирающая анализируемый участок фокальной плоскости;
- ион-электронный преобразователь — умножитель вторичных электронов («ион — лавина электронов»), который состоит из двух микроканальных пластин (**МКП**) в шевронной сборке;

- специализированная большая интегральная схема (**БИС**), содержащая 384 счетных канала, УБ5709ИК01-2.11 ШЖГК.431214.111 ТУ;
- многослойное керамическое основание, на котором размещены узлы прибора и интерфейсные разъемы;

- разъемы для подключения контроллера прибора, напряжения питания БИС и высокого напряжения питания МКП;
- металлический немагнитный экран для защиты от попадания ионов на элементы конструкции прибора, кроме фокальной плоскости;
- тестовые выводы для проверки работоспособности в отсутствие ионных пучков.

Основные технические характеристики КЧД:

- обеспечивает одновременное детектирование ионов изотопов элементов в широком спектре масс исследуемого вещества и в широком диапазоне концентраций (от 10^{-7} до 100%);
- участок спектра одновременно детектируемых ионов составляет 9,6 мм;
- содержит 384 независимых счетных канала;
- скорость счета детектируемых частиц 3 МГц;
- минимальный заряд, регистрируемый детектором, $1,6 \cdot 10^{-13}$ Кл;
- напряжение питания БИС 5 В;
- потребляемый ток не более 30 мА;
- напряжение питания МКП 2000 В;
- габариты 45×48 мм, толщина 5 мм (без учета высоты стоек).

Принцип работы детектора

Термин «координатно-чувствительный детектор заряженных частиц» обозначает выполненное на полупроводниковом кристалле устройство, предназначенное для одновременного детектирования разделенного в пространстве спектра заряженных частиц и расположенное в фо-

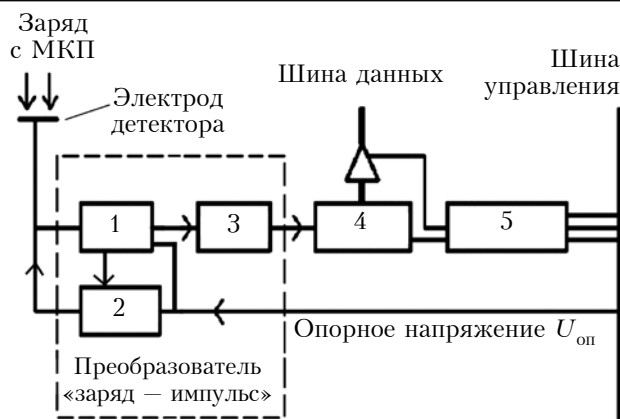


Рис. 1. Упрощенная схема координатно-чувствительного детектора заряженных частиц (один канал): 1 — компаратор; 2 — разряд; 3 — импульс; 4 — счетчик; 5 — управление

кальной плоскости спектрометра, размеры которого определяются числом детекторов и шагом периодической структуры КЧД.

На рис. 1 приведена упрощенная схема координатно-чувствительного детектора заряженных частиц, построенного на специально разработанной БИС, которая подробно описана в [7, 8].

Каждый из 384 электродов детектора представляет собой полоску алюминия на поверхности кристалла БИС, соединенную с компаратором. Число таких полосок определяет число детекторов на кристалле. Компаратор представляет собой устройство, чувствительное к заряду потока электронов, попадающих на поверхность алюминиевой полоски. Следовательно, для того чтобы находящийся в фокальной плоскости масс-спектрометра ион был зарегистрирован как единичное событие (один ион — один импульс счетчика), необходимо установить перед детектором преобразователь «ион — лавина электронов». Лавина электронов должна изменить потенциал электрода, против которого находится ион, до значения ниже порога срабатывания компаратора — только в этом случае компаратор переключится, сформирует единичный импульс счета для конкретного счетчика и за счет обратной связи установит вход компаратора в исходное состояние. При этом во избежание просчетов детектора весь процесс должен проходить достаточно быстро, до прихода следующего иона на детектор.

Ион-электронный преобразователь на микроканальных пластинах

Типовая МКП [9] представляет собой стеклянную пластину с сотовой структурой из большого числа (500—1000) регулярно расположенных и спеченных вместе шестиугольных микроканальных сот. Каждая сота состоит из множества (5000—10000) регулярно расположенных и спеченных вместе миниатюрных трубчатых каналов диаметром 5—25 мкм, плотность их размещения

($0,5—5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$). Конструктивно в составе МКП можно выделить активный элемент — микроканальную вставку или монокристаллическое обрамление.

Основным материалом МКП являются свинцово-силикатные стекла. К гладкости и чистоте поверхностей торцов и каналов предъявляются жесткие требования. Для параллельного электрического соединения каналов на обе стороны МКП термически напыляют в вакууме контактное металлическое покрытие (обычно нихром, хром или сплав «Inconel») толщиной 0,2—0,4 мкм, которое заглубляют на входе и выходе каналов. Каналы МКП обычно наклонены на $4—13^\circ$ относительно нормали к торцам. Вся конструкция должна быть механически прочной, с максимально совершенной геометрической структурой каналов и минимумом структурных дефектов.

Суммарное сопротивление между электродами составляет $10^8—10^9 \text{ Ом}$ и определяется химическим составом стекла, а также сопротивлением резистивно-эмиссионного слоя на поверхности стенок каналов. Формирование резистивно-эмиссионного слоя происходит путем термоводородного восстановления на этапе производства МКП.

Современные микроканальные пластины, используемые отдельно или в сборке, позволяют одновременно достичь коэффициента электронного умножения порядка $10^4—10^7$ и очень высоких значений временного разрешения ($<100 \text{ пс}$) и пространственного разрешения, которое ограничено только размерами канала и шагом сотовой структуры.

Базовым элементом МКП является трубчатый канал диаметром d , длиной l , калибром $a = l/d$. Особенностью микроканальной структуры МКП является то, что коэффициент умножения не является функцией длины канала или его диаметра, а зависит от их отношения, т. е. калибра.

При изготовлении МКП на поверхности канала формируется резистивно-эмиссионный слой (РЭС) толщиной 0,2—0,3 мкм, состоящий в первом приближении из двух слоев: верхнего, очень тонкого (порядка 10 нм) эмиссионного (обеспечивающего вторичную электронную эмиссию), почти диэлектрического слоя на основе кремнезема SiO_2 и нижнего, более толстого, резистивного, в котором сосредоточен восстановленный свинец и который обладает электропроводностью.

На канал подается напряжение питания U , и по РЭС течет ток проводимости $I_{\Pi} = U/R$. Ток создает падение напряжения, и в канале возникает однородное электрическое поле с линейно нарастающим потенциалом $(U/l)_x$, напряженность которого $E = U/l$ направлена по оси канала x . Влетающий в канал электрон, сталкивается вблизи входа с поверхностью — осуществляется первое соударение. При этом в среднем выбивается больше одного вторичного электрона: коэффициент вторичной электронной эмиссии при

первом соударении $\sigma_1 > 1$. Попад в электрическое поле, вторичный электрон набирает энергию, увеличивает под действием осевой силы $F = eE$ осевую составляющую скорости v_x , перемещается вдоль канала к выходу, набирая энергию, а под влиянием поперечной составляющей начальной скорости v_{0y} , на которую поле в канале не действует, он смещается еще и в поперечном направлении. В общем случае траекторией вторичного электрона является парабола, вид которой определяется начальными условиями (энергией и углом вылета электрона) и напряженностью поля в канале. В результате вторичные электроны вновь сталкиваются со стенкой и вновь генерируют электроны. Указанный процесс происходит лавинообразно, и лавина электронов за время порядка 10^{-9} с оказывается на выходе канала [10].

Коэффициент умножения канала МКП калибром a в предположении, что электроны вылетают перпендикулярно стенкам канала, вычисляется как [8]

$$G = \left(\frac{AV}{2\alpha\sqrt{V_0}} \right),$$

где $A = \delta/\sqrt{V_c}$;

V_c — энергия электрона до столкновения со стенкой канала;

δ — коэффициент вторичной эмиссии;

V — напряжение на МКП;

V_0 — начальная энергия вторичного электрона (1–2 эВ).

Анализ показывает, что коэффициент усиления зависит от напряжения питания (напряженности поля в канале), калибра канала, вторично-эмиссионных свойств резистивно-эмиссионного слоя и некоторых других факторов.

Устранить ионную обратную связь [11] и получить достаточное усиление для работы в режиме прямого счета ионов позволяет использование двух МКП в шевронной сборке (рис. 2).

В КЧД используются микроканальные пластины F2370-01 фирмы Hamamatsu (Япония). Эта МКП, строение которой показано на рис. 3, имеет размеры, оптимальные для размещения над зарядочувствительным участком кристалла, а достаточно малый диаметр канала (меньше ширины одного зарядочувствительного электрода БИС) позволяет обеспечивать высокое разрешение прибора.

Параметры МКП F2370-01:

- внешние размеры $A-A'$ 15,9×9,4 мм;
- рабочая область $C-C'$ 13×6,5 мм;
- толщина 0,48 мм;
- диаметр канала 12 мм;
- шаг ячеек 15 мкм;
- угол наклона каналов 8° ;
- коэффициент рабочей поверхности 60%;
- материал электродов “Inconel”;

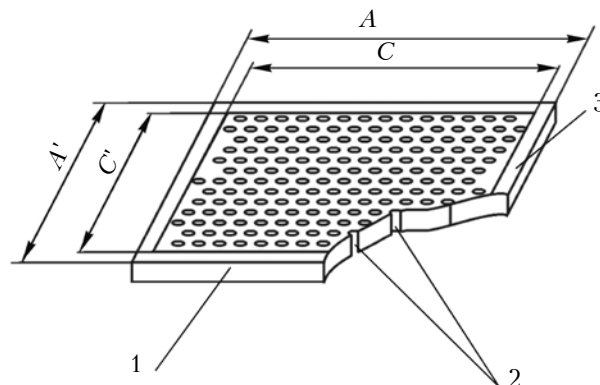


Рис. 3. Строение МКП F2370-01:

1 — стекловидная структура; 2 — каналы; 3 — область электродов

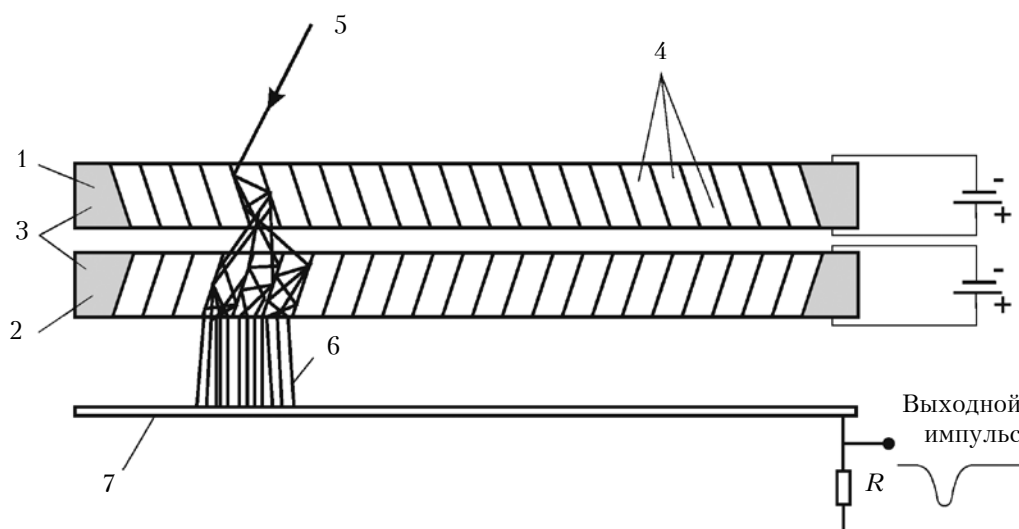


Рис. 2. Образование электронной лавины в шевронной сборке (на каждой МКП $V \approx 1$ кВ):

1, 2 — МКП; 3 — шевронная сборка; 4 — каналы; 5 — первичное излучение; 6 — электронная лавина; 7 — анод (электрод КЧД)

- минимальное усиление 10^4 ;
- сопротивление 20 – 120 МОм;
- темновой ток 0,5 пА/см²;
- напряжение питания 1,0 кВ;
- температура окружающей среды: –50...+70°C.

Ион-электронный преобразователь состоит из двух таких пластин, собранных в отдельный функциональный и конструктивный узел (шеvronная сборка), промежуток между МКП составляет 100+5 мкм (рис. 4).

По причине хрупкости микроканальных пластин и их высокой стоимости были предприняты необходимые конструктивные меры, направленные на защиту МКП от механических нагрузок, возникающих при их установке в конструкцию и при эксплуатации в составе прибора в широком температурном диапазоне (0 – 150°C). Каждая МКП была установлена в специальную керамическую рамку из вакуумной керамики ВК-96 с отверстием под размеры МКП плюс 100 мкм, толщиной 0,48 мм с допуском минус 10 мкм. Рамки для МКП изготавливались аналогично элементам корпуса.

Электрический контакт в МКП обеспечивается двумя слоями металлизированного полиимида толщиной 50 мкм каждый, из которого изготовлены гибкие электроды для подвода к МКП высокого напряжения. Нижний промежуточный электрод установлен металлической стороной вниз и обеспечивает подачу потенциала на верхнюю поверхность нижней МКП, верхний промежуточный электрод — металлизацией вверх и обеспечивает подачу потенциала на нижнюю поверхность верхней МКП [12, 13]. Концы электродов методом ультразвуковой сварки присоединены к металлизированным дорожкам на керамической основе корпуса. За счет полиимида такая конструкция обеспечивает «мягкость» посадки МКП при прижимании.

Керамические элементы корпуса изготовлены из керамики ВК-96 лазерной резкой с последующим шлифованием для обеспечения необходимой точности размеров.

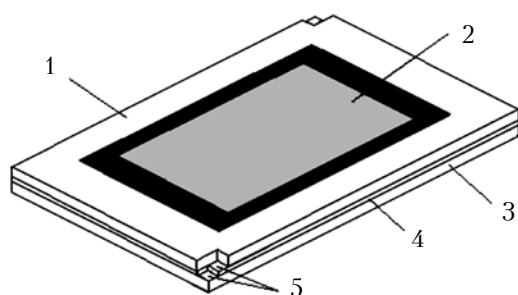


Рис. 4. Шевронный узел:

- 1 — держатель верхней МКП; 2 — верхняя МКП;
3 — держатель нижней МКП; 4 — промежуточный электрод; 5 — контакты

Все операции по сборке элементов прибора проводятся под микроскопом типа МБС-9 для оптического позиционирования деталей. Элементы корпуса соединяются склеиванием компаундом СИЭЛ 159-322А, обладающим высокой текучестью, с последующим высушиванием при температуре 150°C в течение трех часов. Толщина компаунда при таких операциях обычно составляет 10 мкм. После сушки корпус готов к установке кристалла БИС, приваренного к гибкому носителю.

Перед установкой в корпус микросхема извлекается из тары-спутника. С помощью скальпеля от гибкого носителя отделяются технологические области по краям. Металлизированное дно колодца смачивается кремнийорганическим компаундом, после чего в него устанавливается кристалл, при этом носитель укрывает большую часть площади внутри держателя шевронного узла. Для позиционирования кристалла на гибком носителе предусмотрены специальные выступы, которые совмещаются с гранями колодца под микроскопом, после чего кристалл прижимается. Так же, как и при сборке корпуса, сушка проводится в течение трех часов при температуре 150°C.

Рамки с МКП и промежуточные электроды последовательно укладываются в держатель шевронного узла — специальную выемку на корпусе. Входная поверхность верхней МКП, куда попадает ионный пучок, является фокальной плоскостью детектора.

Для закрепления экрана в корпусе устанавливаются четыре стойки из диэлектрика (фторопласта) с целью обеспечения электрической изоляции между экраном и металлической передвижной кареткой масс-спектрометра. Стойки из фторопласта устанавливаются через отверстия в основании корпуса и закрепляются с помощью фторопластовых гаек, высота которых обеспечивает расстояние в 1,5 мм между экраном и фокальной плоскостью и 3,2 мм от нижней (базовой) плоскости.

Основные узлы КЧД показаны на рис. 5, а на рис. 6 — его фотография в сборе.

Исследование экспериментальных образцов координатно-чувствительных детекторов заряженных частиц в составе масс-спектрометра

Изготовленные в Институте микроприборов НАНУ экспериментальные образцы координатно-чувствительного детектора прошли исследования в Институте прикладной физики НАН (г. Сумы) в качестве регистраторов ионов для определения компонентного состава вещества в составе лазерного масс-спектрометра с удлиненной фокальной плоскостью анализатора МС3103 [1, 14].

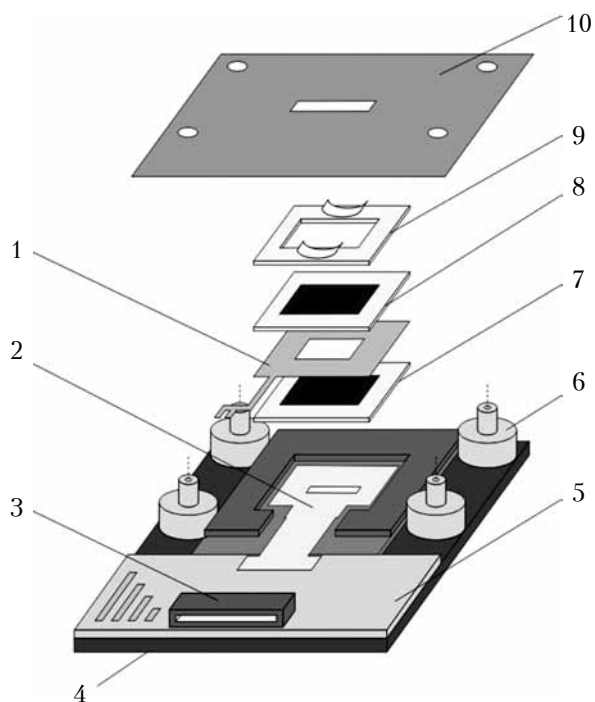


Рис. 5. Основные узлы КЧД:

1 — промежуточный электрод к МКП ($h = 100$ мкм);
2 — гибкий носитель с кристаллом БИС; 3 — ZIF-разъем XF-2M 2415; 4 — керамическое основание; 5 — печатная плата (стеклотекстолит); 6 — стойка крепления экрана; 7, 8 — МКП с керамическим обрамлением; 9 — прижимная рамка; 10 — экран

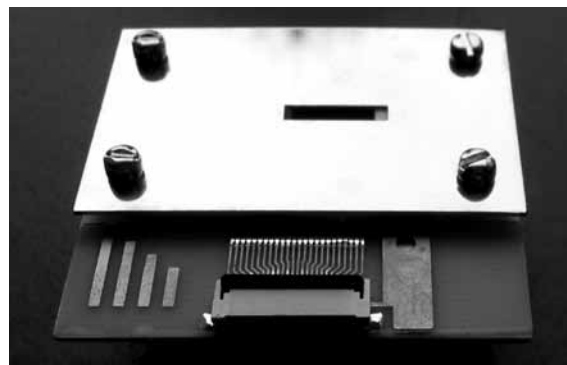


Рис. 6. Фотография КЧД в сборе

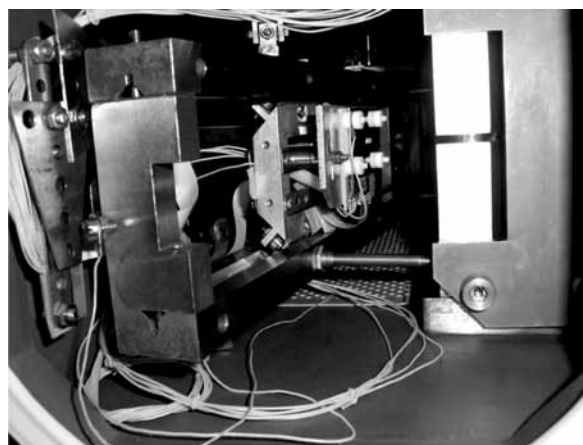


Рис. 7. Фотография КЧД в камере масс-спектрометра

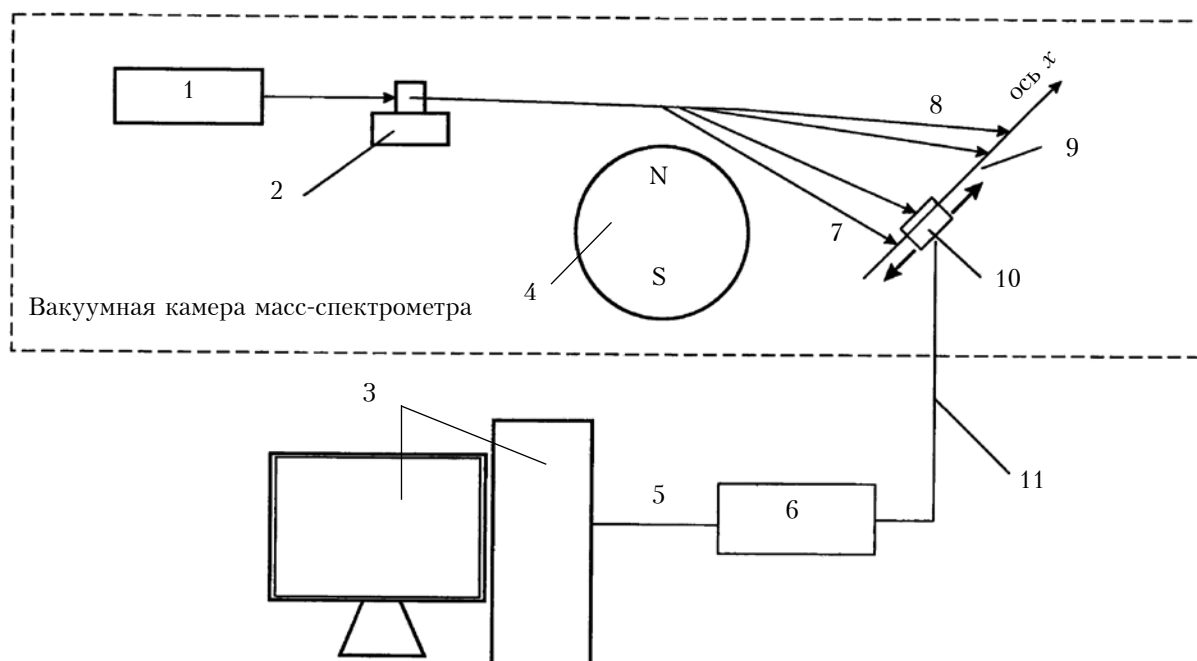


Рис. 8. Блок-схема лазерного масс-спектрометра с КЧД заряженных частиц:

1 — лазер; 2 — источник ионов (исследуемый материал); 3 — компьютер; 4 — отклоняющая система (электромагнит); 5 — интерфейс RS-232; 6 — контроллер (32 bit AVR-based); 7 — легкие ионы; 8 — тяжелые ионы; 9 — решетка; 10 — КЧД; 11 — интерфейсный кабель

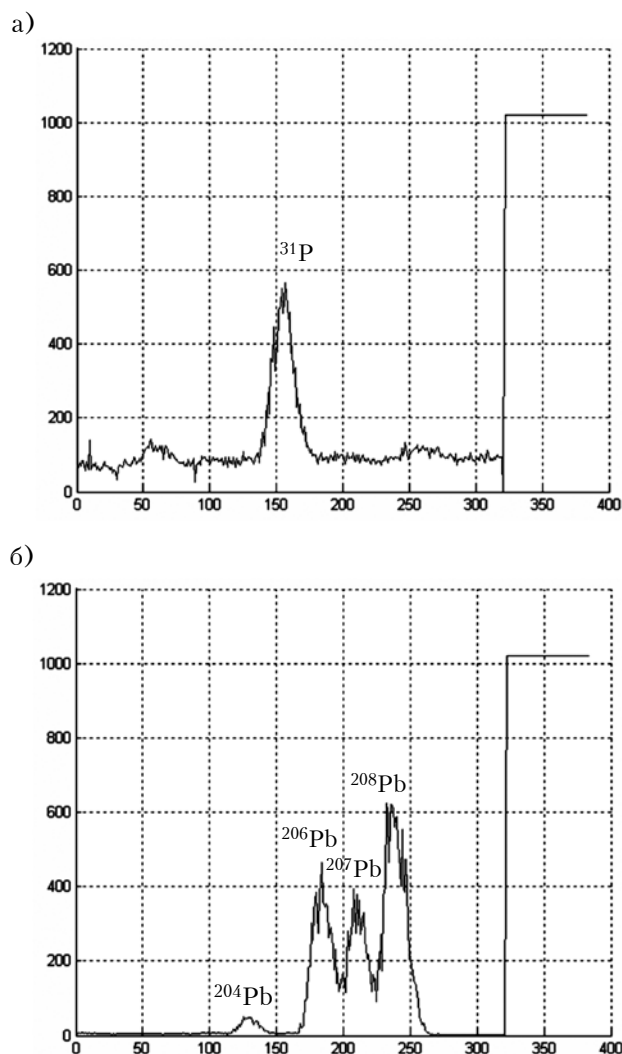


Рис. 9. Спектры изотопов фосфора (а) и свинца (б), полученные при исследовании образца бронзы с помощью КЧД в составе масс-спектрометра

Фотография детектора, установленного в камере масс-спектрометра в фокальной плоскости магнитного анализатора, приведена на **рис. 7**, а на **рис. 8** — блок-схема спектрометра с разработанным КЧД.

Исследуемое вещество распыляется под действием лазерного излучения, отклоняющая система масс-спектрометра изменяет траекторию частиц таким образом, что в зависимости от их координат на оси x можно однозначно сделать вывод о составе материала и наличии примесей в нем. Координатно-чувствительный детектор, перемещаясь по каретке, фиксирует наличие и интенсивность ионных пучков вдоль всей фокальной плоскости (оси x), регистрируя таким образом весь спектр ионов.

Проведенные исследования прибора КЧД подтвердили его высокую чувствительность — зафиксированы изотопы сурьмы ^{121}Sb и ^{123}Sb ,

атомная доля которых составляла, соответственно, всего 0,0008 и 0,0006%.

На **рис. 9** приведены спектры, полученные при исследовании образца бронзы М662. Спектры исследуемых изотопов считывались каждые 2 с и накапливались 45 с. Атомная доля зарегистрированных изотопов была следующей: 0,043% ^{31}P ; 0,023% ^{204}Pb ; 0,36% ^{206}Pb ; 0,37% ^{207}Pb ; 0,83% ^{208}Pb .

Заключение

Проведенные исследования показали, что использование разработанного координатно-чувствительного детектора заряженных частиц в составе лазерного масс-спектрометра с удлиненной фокальной плоскостью анализатора позволяет одновременно получать информацию про весь элементный состав анализируемого вещества в масштабе реального времени. Это позволяет значительно сократить массу, габариты и потребление энергии детектором, уменьшить время анализа и затраты исследуемого материала по сравнению с используемыми в настоящее время методом фоторегистрации и методом последовательного измерения по каждому каналу с применением цилиндров Фарадея. При этом предложенный КЧД может быть использован не только для комплектации новых масс-спектрометров, но и для переоснащения тех, что уже находятся в эксплуатации.

Следует также отметить, что архитектура функциональной схемы и конструкция используемой специализированной БИС УБ5709ИК01-2.11 рассчитаны на возможность создания многокристаллических детекторов с использованием соответствующих микроканальных пластин. Так, при использовании двух МКП Hamamatsu F4772-01 и пяти таких БИС можно реализовать координатно-чувствительный детектор с длиной фокальной плоскости магнитного анализатора 5 см, увеличив до 1920 число каналов, одновременно участвующих в анализе.

Создание специализированной БИС для координатно-чувствительных детекторов с проектными нормами 1 мкм и менее даст возможность увеличить емкость счетчиков в 16 и более раз, повысить быстродействие и чувствительность, уменьшить количество БИС в детекторе с 5-см длиной фокальной плоскости.

Разработанный координатно-чувствительный детектор может быть использован и в других приборах, предназначенных для регистрации профилей и пространственного положения пучков нейтральных и заряженных частиц и направленных потоков фотонов, применяющих в качестве вторичных преобразователей цифровые микроэлектронные позиционно-чувствительные регистраторы пространственного положения и интенсивности электронных пучков. Есть сообще-

ния об использовании аналогичных приборов в фотоэлектронной спектроскопии [15].

Использование такого детектора позволит создать современные приборы элементного анализа веществ, в том числе масс-спектрометры и другие приборы регистрации профиля и пространственного положения пучков нейтральных и заряженных частиц, которые найдут широкое применение во многих отраслях промышленности, в том числе горнодобывающей, металлургической, химической, фармацевтической, атомной энергетике, материаловедении, медицине, криминалистике, охране окружающей среды, космических исследованиях, научных исследованиях.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сидоренко В.П. С опытом прошлых лет в новый век // В сб. «Стратегия выбора. 50 лет Киевскому НИИ микроприборов (1962–2012)». — Киев: Корнійчук, 2012. — С. 475 — 480.
2. Патент України 94103. Мікроелектронний координатно-чутливий детектор мас-спектрометра / Борискін О.І., Вербицький В.Г., Єременко В.М. та ін. — 11.04.2011.
3. Патент США 5296816. Integrated circuit sensor and detector and spectrometers incorporating the sensor / K. Birkinshaw. — 22.03 1994.
4. Birkinshaw K. Detector Arrays in Spectroscopy // International Reviews in Physical Chemistry. — 1996. — Vol. 15, iss. 1. — P. 13–40. <http://dx.doi.org/10.1080/01442359609353172>
5. Langstaff, D.P., Bushell A., Chase T., Evans D.A. A fully integrated multi-channel detector for electron spectroscopy // Nuclear Instruments and Methods B. — 2005. — Iss. 1–4 — P. 219–223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2005.06.187>
6. Langstaff D.P., Evans D.A., Roberts O.R., Zhu Xi. Progress on the Aberystwyth Electron Counting Array // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Vol. 604, no. 1-2. — P. 133–135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2009.01.040>

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

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

9. Кулов С.К. Физика и применение МКП // <http://www.baspik.com> По этой ссылке не получается найти нужный материал, и никаким другим путем тоже. Можно ли заменить источник на другой, более доступный?

10. Schagen P. In “Advances in Image Pickup and Display” / Ed. by B. Kazan. — Vol. 1. — P. 16. — New York: Academic Press, 1974.

11. Wiza J.L. Microchannel plate detectors // Nuclear Instruments and Methods. — 1979. — Vol. 162, iss. 1–3. — P. 587-601. [http://dx.doi.org/10.1016/0029-554X\(79\)90734-1](http://dx.doi.org/10.1016/0029-554X(79)90734-1)

12. Шеревеня А.Г., Цуканов Л.Н., Тучинский И.А., Жора В.Д. Технология изготовления систем выводов на носителе для беспроводной сборки ИС // В сб.: Научно-технические достижения. — Москва: ВИМИ, 1984. — № 4. — С. 34–41.

13. Грунянская В.П., Жора В.Д., Солдатенко Л.М., Тучинский И.А. Специализированные БИС на основе базовых матричных кристаллов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2000. — № 1. — С. 3–5.

14. Борискин А.И., Ерёмченко В.М., Мордик С.Н. и др. Исследование ионно-оптических характеристик лазерного масс-спектрометра с координатно-чувствительным микроэлектронным детектором // Журнал технической физики. — 2008. — Т. 78, № 7. — С. 111–117.

15. Langstaff D.P., Chase T., Roberts O.R. et al. A 768-channel detector for photoelectron spectroscopy using synchrotron radiation // Proc. of the 5th Int. Conf. on Synchrotron Radiation in Materials Science. — SRMS5- 297. — Chicago, 2006.

Дата поступления рукописи
в редакцию 15.09 2016 г.

В. П. СИДОРЕНКО¹, Ю. В. ПРОКОФ'ЄВ¹, Д. С. МУРЧЕНКО¹,
В. М. ЄРЕМЕНКО², А. В. ШЕЛЕХОВ²

Україна, м. Київ, ¹НДІ мікроприладів НАНУ; м. Суми, ²Інститут прикладної фізики НАНУ
E-mail: sidorenko@imd.org.ua

КООРДИНАТНО-ЧУТЛИВИЙ ДЕТЕКТОР ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ДЛЯ СПЕКТРОСКОПІЇ

Розроблено, виготовлено та досліджено координатно-чутливий детектор заряджених частинок для спектроскопії, який може використовуватися в аналітичній апаратурі, забезпечуючи одночасний аналіз всього елементного складу матеріалів з високою чутливістю і точністю. Детектор побудовано на основі розробленої спеціалізованої великої інтегральної схеми і мікроканальних пластин.

Ключові слова: координатно-чутливий детектор, спектроскопія, елементний аналіз, склад матеріалу, велика інтегральна схема, мікроканальна пластина.

DOI: 10.15222/ТКЕА2016.4-5.53
UDC 539.1.074

V.P. SIDORENKO¹, Yu. V. PROKOFIEV¹,
D. S. MURCHENKO¹, V. M. YEREMENKO²,
A. V. SHELEHOV²

Ukraine, Kyiv, RI of Microdevices of NAS of Ukraine;

²Sumy, Institute of Applied Physics of NAS of Ukraine

E-mail: sidorenko@imd.org.ua

COORDINATE-SENSITIVE CHARGED PARTICLE DETECTOR FOR SPECTROSCOPY

The authors have designed, manufactured and tested a coordinate-sensitive detector for charged particle spectroscopy. The detector can be used in the devices for the elemental analysis of materials, providing simultaneous analysis of all the elemental composition with high sensitivity and precision. The designed device is based on an integrated circuit (IC) and a microchannel plate (MCP) electron multiplier. The IC is mounted on a ceramic substrate. Ions fall on the MCP mounted above the IC. Giving rise to a pulse which typically exceeds 10^6 electrons, each ion falls on the detector electrodes and these pulses are counted. In this research, a two stage stack of MCPs (Hamamatsu) was used. The MCPs have a channel diameter of 12 μm on a 15 μm pitch. The results of tests carried out in a mass spectrometer are presented. The designed detector is small, light, and low-power.

Keywords: coordinate-sensitive detector, spectroscopy, elemental analysis, material composition, large scale integrated circuit, microchannel plate.

REFERENCES

1. Sidorenko V.P. In book «*Strategiya vybora. 50 let Kievskomu NII mikropriborov (1962-2012)*». Kiev, Kornichuk, 2012, pp. 475-480. (Ukr, Rus)
2. Boryskin O.I. et al. [*Microelectronic position sensitive detector of a mass-spectrometer*]. Patent UA, no. 94103, 2011.
3. Birkinshaw K. *Integrated circuit sensor and detector and spectrometers incorporating the sensor*. Patent USA, no. 5296816, 1994.
4. Birkinshaw K. Detector Arrays in Spectroscopy. *International Reviews in Physical Chemistry*, 1996, vol. 15, iss. 1, pp.13-40. <http://dx.doi.org/10.1080/01442359609353172>
5. Langstaff, D.P., Bushell, A., Chase T., Evans, D.A. A fully integrated multi-channel detector for electron spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods B*, 2005, iss. 1-4, pp. 219-223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2005.06.187>
6. Langstaff D.P., Evans D.A., Roberts O.R., Zhu Xi. Progress on the Aberystwyth Electron Counting Array. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, vol. 604, no. 1-2, pp. 133-135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2009.01.040>
7. Sidorenko V. P., Verbitskiy V. G., Prokofiev Yu. V., Kyziak A. Yu., Nikolayenko Yu. E. [VLSI for microelectronic coordinate-sensitive detector of the devices for element analysis of substance]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2009, no. 2, pp. 25-29. (Rus)
8. Sidorenko V. P., Verbitskiy V. G., Prokofiev Yu. V. [Circuit design of VLSI for microelectronic coordinate-sensitive detector for material element analysis]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2012, no. 4, pp. 39-46. (Rus)
9. Kulov S.K. Fizika i primeneniye MKP
10. Schagen P. In "Advances in Image Pickup and Display", ed. by B. Kazan, vol. 1, p. 16, Academic Press, New York, 1974.
11. Wiza J.L. Microchannel plate detectors. *Nuclear Instruments and Methods*, 1979, vol. 162, iss. 1-3, pp. 587-601. [http://dx.doi.org/10.1016/0029-554X\(79\)90734-1](http://dx.doi.org/10.1016/0029-554X(79)90734-1)
12. Sherevenya A.G., Tsukanov L.N., Tuchinskii I.A., Zhora V.D. In: *Nauchno-tehnicheskie dostizheniya*. Moscow, VIMI, 1984, no. 4, pp. 34-41. (Rus)
13. Grun'yanskaya V.P., Zhora V.D., Soldatenko L.M., Tuchinskii I.A. [Specialized LSI based gate array]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2000, no. 1, pp. 3-5. (Rus)
14. Boriskina A. I., Eremenko V. M., Mordyk S. N., Savin O. R., Skripchenko A. N., Storizhko V. E., Khomenko S. N. Ion-optical characteristics of a laser mass spectrometer with a coordinate-sensitive microelectronic detector. *Technical Physics*, 2008, vol. 53, iss. 7, pp. 927-933.
15. Langstaff D.P., Chase T., Roberts O.R., McGlynn A., Veary-Roberts A.R., Evans D.A., Greaves G.N. A 768-channel detector for photoelectron spectroscopy using synchrotron radiation. *Proc. of the 5th Int. Conf. on Synchrotron Radiation in Materials Science*, Chicago, 2006, SRMS5- 297.

К. т. н. В. П. ЗАЙКОВ, д. т. н. В. М. МЕЩЕРЯКОВ, к. т. н. Ю. И. ЖУРАВЛЁВ

Украина, Одесская национальная академия пищевых технологий

E-mail: gradan@ua.fm

МОДЕЛЬ ВЗАИМОСВЯЗИ ГЕОМЕТРИИ ВЕТВЕЙ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОДНОКАСКАДНЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ В РЕЖИМЕ $Q_{0\max}$

Рассмотрено влияние геометрии ветвей термоэлементов на показатели надежности однокаскадных термоэлектрических устройств (ТЭУ), работающих в режиме максимальной холодопроизводительности, при тепловой нагрузке 2,0 Вт для различных перепадов температуры (от 10 до 60 К). Предложена модель взаимосвязи этих параметров. Показано, что с уменьшением отношения высоты ветви термоэлемента к площади ее поперечного сечения интенсивность отказов однокаскадного ТЭУ уменьшается, а следовательно, вероятность безотказной работы увеличивается.

Ключевые слова: термоэлектрическое устройство, геометрия ветви термоэлемента, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы, надежность.

В настоящее время термоэлектрическое охлаждение широко применяется в различных отраслях современной техники. Область его использования распространяется на радиоэлектронику, квантовую оптику, СВЧ-технику, автономные и возобновляемые источники энергии, измерительную технику, метрологию, медицинскую аппаратуру, а также на устройства кондиционирования и многочисленные приборы бытовой техники.

Основные преимущества термоэлектрического способа охлаждения перед другими заключаются в высокой надежности, малых габаритах, простоте управления и быстрейшем действии устройств. Эти преимущества по своей сути являются следствием твердотельной природы таких охладителей, т. е. отсутствия движущихся частей, перекачиваемых жидкостей или газов.

Вопросам теоретического и экспериментального исследования охлаждающих термоэлектрических устройств (ТЭУ) посвящено достаточно много работ, например [1–7]. Вместе с тем, изучение такого важного для практического применения ТЭУ вопроса, как повышение их надежности, остается весьма актуальным.

Существуют различные способы достижения необходимого уровня показателей надежности ТЭУ [8]. Одним из них является выбор величины рабочего тока I и, соответственно, режима работы ТЭУ при заданной геометрии ветви термоэлемента (отношении высоты l ветви к площади ее поперечного сечения S) [9–11]. Другой способ — параметрический — заключается в улучшении качества исходных термоэлектрических материалов, в первую очередь в повышении их эффективности, а также в применении различных сочетаний таких параметров исходных ма-

териалов, как термо-эдс и коэффициент электропроводности [12–15]. В тех случаях, когда при построении ТЭУ используются унифицированные модули, номенклатура размеров которых достаточно широка, перед разработчиком стоит задача рационального выбора геометрии ветвей термоэлементов в зависимости от условий функционирования.

В настоящей работе рассмотрен конструктивный метод повышения надежности однокаскадного ТЭУ и предложена модель взаимосвязи показателей надежности и геометрии ветвей термоэлементов в режиме $Q_{0\max}$.

Исследования проводились для следующих исходных данных:

- тепловая нагрузка $Q_0 = 2,0$ Вт;
- температура тепловыделяющего спая $T = 300$ К;
- значения перепада температуры $\Delta T = 0; 20; 40; 60$ К;
- усредненная термоэлектрическая эффективность $\bar{z}_M = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К;
- номинальная интенсивность отказов $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч;
- назначенный ресурс $t = 10$ ч.

Основные параметры и показатели надежности ТЭУ рассчитывались для различных значений l/S с использованием известных соотношений [1]:

- холодопроизводительность ТЭУ

$$Q_0 = nI^2_{\max} R(2B - B^2 - \Theta) = n\gamma(2B - B^2 - \Theta); \quad (1)$$

- мощность потребления

$$W = 2n\gamma B[B + (\Delta T_{\max}/T_0)\Theta]; \quad (2)$$

- холодильный коэффициент

$$E = Q_0/W = [2B - B^2 - \Theta]/[2B(B + (\Delta T_{\max}/T_0)\Theta)]; \quad (3)$$

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

— относительная величина интенсивности отказов

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{nB^2 [\Theta + C] [B + (\Delta T_{\max}/T_0) \Theta]}{[1 + (\Delta T_{\max}/T_0) \Theta]^2} K_T; \quad (4)$$

— вероятность безотказной работы

$$P = \exp(-\lambda t), \quad (5)$$

где n — количество термоэлементов;

I_{\max} — максимальный рабочий ток, $I_{\max} = \bar{e}T_0/R$;

B — относительный рабочий ток, $B = I/I_{\max}$;

I — величина рабочего тока;

R — электрическое сопротивление ветви термоэлемента;

\bar{e} , $\bar{\sigma}$, $\bar{\gamma}$ — усредненные значения коэффициента термо-эдс, электропроводности и термоэлектрической эффективности ветви термоэлемента соответственно;

T_0 — температура теплопоглощающего спая;

Θ — относительный перепад температуры,

$\Theta = \Delta T / \Delta T_{\max} = (T - T_0) / \Delta T_{\max}$;

ΔT_{\max} — максимальный перепад температуры,

$\Delta T_{\max} = 0,5 \bar{\gamma} T_0^2$;

γ — максимальная термоэлектрическая мощность охлаждения, $\gamma = I_{\max}^2 R = \bar{e}^2 \bar{\sigma} T_0^2 S/l$;

C — относительная тепловая нагрузка,

$C = Q_0 / (nI_{\max}^2 R) = Q_0 / (n\gamma)$;

K_T — коэффициент значимости, зависящий от температуры.

При проведении расчетов учитывалось, что в режиме $Q_{0\max}$ относительный рабочий ток $B = 1,0$ и что при одинаковой тепловой нагрузке Q_0 и перепаде температуры ΔT произведение $n\gamma = \text{const}$ независимо от геометрии ветви термоэлемента.

Результаты расчета основных параметров и показателей надежности ТЭУ для различных соотношений l/S , где $S = a \cdot b$, при постоянной высоте ветви $l = 4$ мм приведены в табл. 1. В табл. 2 приведены результаты расчетов для некоторых возможных вариантов геометрии ветвей термоэлементов при изменении l от 4 до 1 мм.

Анализ приведенных в таблицах расчетных значений основных параметров и показателей надежности показал, что при уменьшении отношения l/S при заданном перепаде температуры ΔT и тепловой нагрузке Q_0 происходит следующее (рис. 1, рис. 2):

— увеличивается термоэлектрическая мощность охлаждения γ , т. е. растет холодопроизводительность, приходящаяся на один термоэлемент;

Таблица 1

Основные параметры и показатели надежности ТЭУ в режиме $Q_{0\max}$ при $l = 4$ мм для различных значений соотношения l/S и при $T = 300$ К, $Q_0 = 2,0$ Вт; $\bar{\gamma} = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К

l/S , см ⁻¹	γ , Вт	$\bar{\epsilon} \cdot 10^4$, В/К	$\bar{\sigma}$, СМ/СМ	$\bar{\alpha} \cdot 10^3$, ВТ/(СМ·К)	n , шт.	$R \cdot 10^3$, ОМ	I_{\max} , А	I , А	U , В	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P	$a \times b$, ММ
$\Delta T = 0$; $\Theta = 0$; $\Delta T_{\max} = 108$ К; $\Delta T_{\max}/T_0 = 0,36$; $W = 4,0$ Вт; $E = 0,5$; $\bar{z} = 2,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $K_T = 1,0$													
40,0	0,081	2,0	900	15,0	24,7	44,4	13,5	1,35	3,0	24,7	74,1	0,99262	1,0×1,0
20,0	0,162				12,3	22,2	2,7	2,7	1,50	12,3	36,9	0,9963	1,41×1,41
10,0	0,324				6,15	11,1	5,4	5,4	0,74	6,15	18,5	0,99815	2,0×2,0
4,5	0,720				2,8	5,0	12,0	12,0	0,33	2,8	8,3	0,99917	3,0×3,0
3,25	0,997				2,0	3,6	16,6	16,6	0,24	2,0	6,0	0,99940	3,5×3,5
2,0	1,62				1,23	2,22	27,0	27,0	0,15	1,23	3,7	0,99963	4,5×4,5
$\Delta T = 20$ К; $\Theta = 0,214$; $K_T = 1,011$; $\Delta T_{\max} = 93,3$ К; $T_{\max}/T_0 = 0,33$; $W = 5,45$ Вт; $E = 0,367$; $\bar{z} = 2,38 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $K_T = 1,011$													
40,0	0,072	1,97	940	15,3	35,4	42,6	1,30	1,30	4,20	35,4	106,2	0,9894	1,0×1,0
20,0	0,143				17,8	21,3	2,60	2,60	2,10	17,8	53,3	0,9947	1,41×1,41
10,0	0,286				8,9	10,64	5,18	5,18	1,05	10,8	32,3	0,9968	2,0×2,0
4,5	0,676				4,0	4,80	11,5	11,5	0,47	4,0	12,1	0,9988	3,07×3,07
3,25	0,880				2,9	3,46	15,9	15,9	0,34	2,93	8,8	0,99912	3,5×3,5
2,0	1,43				1,8	2,13	25,9	25,9	0,21	1,82	5,46	0,99945	4,5×4,5
$\Delta T = 40$ К; $\Theta = 0,5$; $\Delta T_{\max} = 79,8$ К; $\Delta T_{\max}/T_0 = 0,31$; $W = 9,24$ Вт; $E = 0,22$; $\bar{z} = 2,37 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $K_T = 1,022$													
40,0	0,0625	1,94	980	15,6	64,0	40,8	1,24	1,24	7,45	65,4	196,2	0,9806	1,0×1,0
20,0	0,125				32,0	20,4	2,47	2,47	3,74	32,7	98,1	0,9902	1,42×1,42
10,0	0,249				16,1	10,2	4,95	4,95	1,87	16,45	49,4	0,9951	2,0×2,0
4,5	0,554				7,2	4,59	11,0	11,0	0,84	7,4	22,1	0,9978	3,0×3,0
3,25	0,767				5,2	3,32	15,2	15,2	0,61	5,31	15,9	0,99841	3,5×3,5
2,0	1,246				3,2	2,0	25,2	25,2	0,37	3,27	9,81	0,99902	4,5×4,5

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Продолжение табл. 1

l/S , см ⁻¹	γ , Вт	$\bar{\epsilon} \cdot 10^4$, В/К	$\bar{\sigma}$, см/см	$\bar{\alpha} \cdot 10^3$, Вт/(см·К)	n , шт.	$R \cdot 10^3$, Ом	I_{\max} , А	I , А	U , В	λ/λ_0	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P	$a \times b$, мм
$\Delta T = 60 \text{ K}; \Theta = 0,90; \Delta T_{\max} = 66,8 \text{ K}; T_{\max}/T_0 = 0,28;$ $W = 50 \text{ Вт}; E = 0,04; \bar{z} = 2,32 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}; K_T = 1,035$													
40,0	0,053	1,89	1030	15,9	378	38,8	1,17	1,17	42,7	391,0	1171,8	0,8894	1,0×1,0
20,0	0,106				189	19,4	2,34	2,34	21,4	195,3	586,0	0,9431	1,41×1,41
10,0	0,212				94,3	9,71	4,63	4,63	10,7	97,6	293,0	0,9711	2,0×2,0
4,5	0,471				42,5	4,37	10,4	10,4	4,80	44,0	132,0	0,9869	3,0×3,0
3,25	0,652				30,7	3,16	14,4	14,4	3,50	31,8	95,3	0,9905	3,5×3,5
2,0	1,06				18,9	1,94	23,4	23,4	2,14	19,6	58,7	0,9941	4,5×4,5

Таблица 2

Основные параметры и показатели надежности ТЭУ в режиме $Q_{0\max}$ для различных значений соотношения l/S при $T = 300 \text{ K}$, $\Delta T = 40 \text{ K}$, $Q_0 = 2,0 \text{ Вт}$; $\Delta T_{\max} = 79,8 \text{ K}$; $\Theta = 0,5$; $W = 9,24 \text{ Вт}$; $E = 0,22$; $K_T = 1,022$

l/S , см ⁻¹	$I=I_{\max}$, А	γ , Вт	$R \cdot 10^3$, Ом	n , шт.	U , В	$\lambda \cdot 10^8$, 1/ч	P	l , мм	$a \times b$, мм
40,0	1,24	0,0625	40,8	64,0	7,50	196,2	0,9806	4,0	1,0×1,0
								3,0	0,9×0,9
								2,0	0,7×0,7
								1,5	0,6×0,6
								1,0	0,5×0,5
20,0	2,47	0,125	20,4	32,0	3,74	98,1	0,9902	4,0	1,4×1,4
								3,0	1,2×1,2
								2,0	1,0×1,0
								1,5	0,9×0,9
								1,0	0,7×0,7
10,0	4,95	0,25	10,2	16,0	1,87	49,4	0,9951	4,0	2,0×2,0
								3,0	1,7×1,7
								2,0	1,4×1,4
								1,5	1,2×1,2
								1,0	1,0×1,0
4,5	11,0	0,55	4,6	7,2	0,84	22,1	0,9978	4,0	3,0×3,0
								3,0	2,6×2,6
								2,0	2,1×2,1
								1,5	1,8×1,8
								1,0	1,5×1,5
3,25	15,2	0,767	3,32	5,2	0,61	15,9	0,9984	4,0	3,5×3,5
								3,0	3,0×3,0
								2,0	2,5×2,5
								1,5	2,15×2,15
								1,0	1,8×1,8
2,0	25,2	1,246	2,0	3,2	0,37	9,8	0,99902	4,0	4,5×4,5
								3,0	3,9×3,9
								2,0	3,2×3,2
								1,5	2,7×2,7
								1,0	2,2×2,2

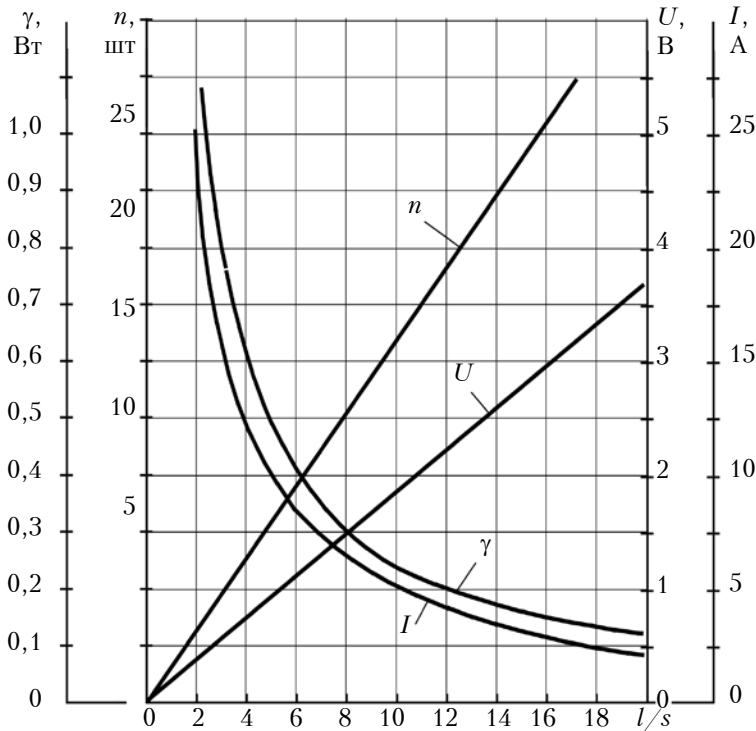


Рис. 1. Зависимость параметров γ , n , I , U однокаскадного ТЭУ от отношения l/S при $T = 300$ К, $\Delta T = 40$ К, $Q_0 = 2,0$ Вт в режиме $Q_{0\max}$

- уменьшается количество термоэлементов n ;
- увеличивается величина рабочего тока I ;
- уменьшается падение напряжения U ;
- уменьшается интенсивность отказов λ ;
- увеличивается вероятность безотказной работы P , при этом мощность потребления W и холодильный коэффициент E остаются постоянными.

Так, например, использование в ТЭУ термоэлемента с геометрией ветви $l/S = 10$ вместо $l/S = 20$ позволяет в два раза увеличить термоэлектрическую мощность охлаждения γ и во столько же раз уменьшить количество термоэлементов и интенсивность отказов λ .

Анализ результатов проведенных расчетов показал, что с ростом перепада температуры ΔT для различных фиксированных значений l/S происходит следующее (рис. 3—6):

- уменьшается максимальная термоэлектрическая мощность охлаждения γ ;

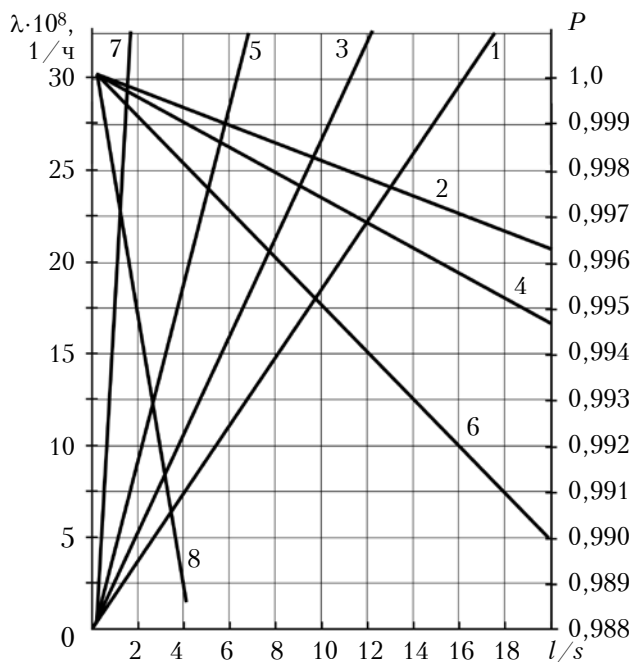


Рис. 2. Зависимость интенсивности отказов λ (1, 3, 5, 7) и вероятности безотказной работы P (2, 4, 6, 8) однокаскадного ТЭУ от отношения l/S для режима $Q_{0\max}$ при $T = 300$ К, $Q_0 = 2,0$ Вт и различных значений ΔT :

1, 2 — $\Delta T = 0$ ($W = 4,0$ Вт; $E = 0,5$); 3, 4 — $\Delta T = 20$ К ($W = 5,45$ Вт; $E = 0,367$); 5, 6 — $\Delta T = 40$ К ($W = 9,2$ Вт; $E = 0,22$); 7, 8 — $\Delta T = 60$ К ($W = 50$ Вт; $E = 0,04$)

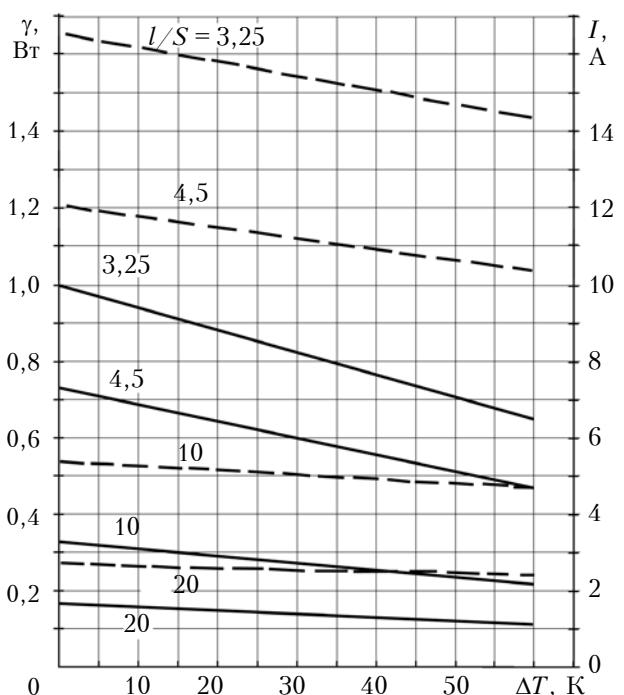


Рис. 3. Зависимость максимальной термоэлектрической мощности охлаждения γ (сплошные линии) и рабочего тока I (пунктир) однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT для различных значений отношения l/S в режиме $Q_{0\max}$ при $T = 300$ К, $Q_0 = 2,0$ Вт

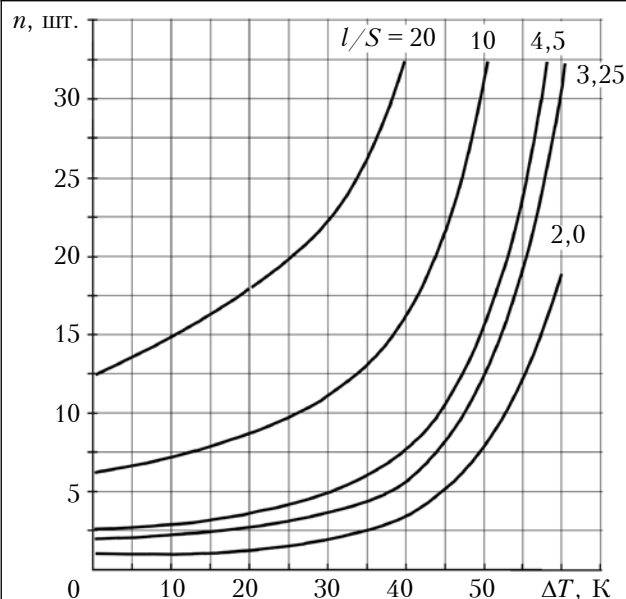


Рис. 4. Зависимость количества термоэлементов n однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT для различных значений l/S в режиме $Q_{0\max}$ при $T = 300$ К, $Q_0 = 2,0$ Вт

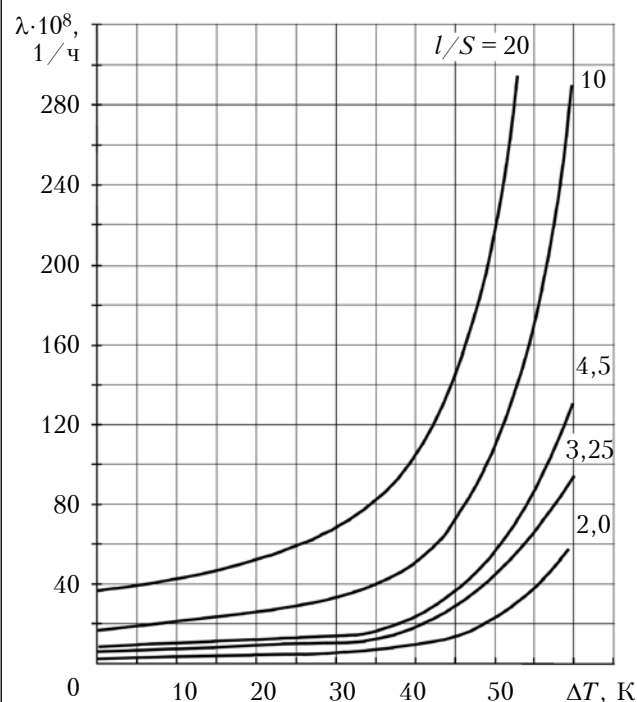


Рис. 5. Зависимость интенсивности отказов λ однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT для различных значений l/S в режиме $Q_{0\max}$ при $T = 300$ К, $Q_0 = 2,0$ Вт, $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/ч

- уменьшается величина рабочего тока I ;
- увеличивается количество термоэлементов n ;
- увеличивается интенсивность отказов λ ;
- уменьшается вероятность безотказной работы P .

Повышение показателей надежности с ростом перепада температуры возможно при использо-

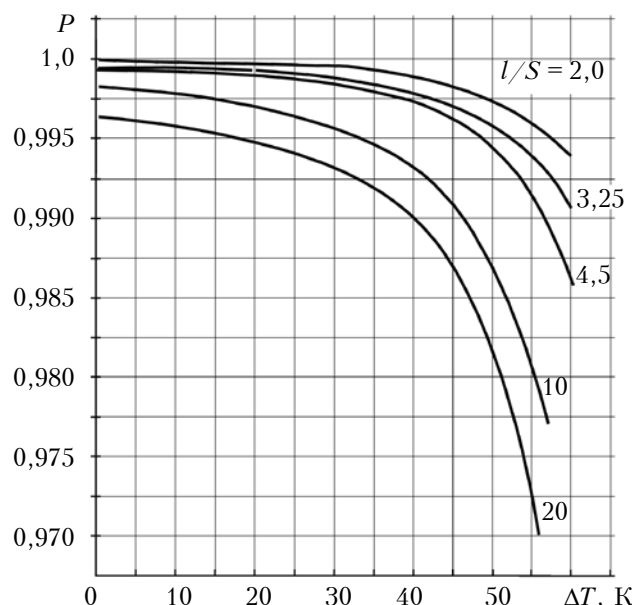


Рис. 6. Зависимость вероятности безотказной работы P однокаскадного ТЭУ от перепада температуры ΔT для различных значений l/S в режиме $Q_{0\max}$ при $T = 300$ К, $Q_0 = 2,0$ Вт

вании ветвей термоэлементов с меньшим отношением l/S . Так, например, при увеличении ΔT от 20 до 40 К использование термоэлементов с геометрией ветви $l/S = 10$ вместо $l/S = 20$ приводит к уменьшению количества термоэлементов в два раза, при этом интенсивность отказов λ также уменьшается вдвое и, следовательно, увеличивается вероятность безотказной работы P .

Таким образом, приведенные результаты расчетов однокаскадных ТЭУ, работающих в режиме $Q_{0\max}$, показали, что использование ТЭУ с меньшим отношением высоты ветви термоэлемента к площади ее поперечного сечения, а значит и лучшими массогабаритными характеристиками, позволяет существенно повысить показатели его надежности при неизменной мощности потребления (энергозатратах).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Anatyshuk L., Vikhor L., Rozver Yu. et al. Research and development on performances of large-sized thermoelectric module with heat pipes // Heat Pipe Science and Technology, An International Journal. — 2011. — Vol. 2, iss. 1-4. — P. 115–120. <http://dx.doi.org/10.1615/HeatPipeSciTech.v2.i1-4.120>
2. Zebajadi, M., Esfarjani, K., Dresselhaus, M. S., Ren, Z. F., Chen, G. Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications // Energy & Environmental Science. — 2012, 5 (1), 5147–5162. <http://dx.doi.org/10.1039/c1ee02497c>
3. Николаенко Ю.Е., Вихор Л.Н. Моделирование нагрузочных характеристик оптимального каскадного термоэлектрического охладителя // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2001. — № 6. — С. 33–35.
4. Николаенко Ю.Е., Вихор Л.Н. Влияние тепловых переходов на температурный перепад многокаскадной термоэлектрической батареи // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2002. — № 4–5. — С. 16–18.
5. Анагычук Л. И., Вихор Л. М., Николаенко Ю. Е. та ін. Великоформатний термоелектричний модуль охолоджен-

ня з тепловими трубами // Термоелектрика. — 2011. — № 1. — С. 51–57.

6. Anatychuk L.I., Vikhor L.N., Rozver Yu.Yu. et al. Research and development on performances of large-sized thermoelectric module with heat pipes // Proc. of the VIII Minsk Int. Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources”. — Minsk, Belarus. — 2011. — Vol. 1. — P. 239-242.

7. Ащеулов А. А., Охрем В. Г., Романюк І. С. Нові термоелектричні ефекти та елементи. — Черновці: Видавничий дім «Родовід», 2015.

8. Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлев Ю. И. Анализ возможностей повышения надежности термоэлектрических охлаждающих устройств // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2015. — Т. 4, № 8. — С. 17–25. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.46553>

9. Моисеев В. Ф., Зайков В. П. Влияние режима работы термоэлектрического устройства на его надежность // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2001. — № 4–5. — С. 30–32.

10. Зайков В. П., Киншова Л. А., Казанжи Л. Д., Храмова Л. Ф. Прогнозирование показателей надежности двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства в режиме Q_{0max} // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 5. — С. 34–37.

11. Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 1. Однокаскадные устройства. — Одесса: Политехперіодика, 2009.

12. Зайков В. П., Мещеряков В. И., Гнатовская А. А., Журавлев Ю. И. Влияние эффективности исходных материалов на показатели надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Часть I: Однокаскадные ТЭУ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2015. — № 1. — С. 44–48. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.1.44>

13. Зайков В. П., Мещеряков В. И., Гнатовская А. А., Журавлев Ю. И. Влияние эффективности исходных материалов на показатели надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Часть II: Двухкаскадные ТЭУ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2015. — № 2-3. — С. 34–38. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.34>

14. Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлев Ю. И. Выбор сочетаний параметров термоэлектрических материалов для разработки охладителей повышенной надежности // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2015. — Т. 3, № 8. — С. 4–14. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42474>

15. Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлев Ю. И. Сравнительный анализ основных параметров и показателей надежности однокаскадных термоэлектрических устройств при использовании различных сочетаний параметров исходных материалов одинаковой эффективности // Холодильная техника и технология. — 2015. — Т. 51, № 4. — С. 37–44. <http://dx.doi.org/10.15673/0453-8307.4/2015.39289>

Дата поступления рукописи
в редакцию 08.09 2016 г.

В. П. ЗАЙКОВ, В. И. МЕЩЕРЯКОВ, Ю. И. ЖУРАВЛЬОВ

Україна, Одеська національна академія харчових технологій

E-mail: gradan@ua.fm

МОДЕЛЬ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ГЕОМЕТРІЇ ГІЛОК ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ І ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ОДНОКАСКАДНИХ ОХОЛОДЖУВАЧІВ У РЕЖИМІ Q_{0max}

Розглянуто вплив геометрії гілок термоелементів на показники надійності однокаскадних термоелектричних пристроїв (ТЕП), що функціонують в режимі максимальної холодопродуктивності, при тепловому навантаженні 2,0 Вт для різних перепадів температури (від 10 до 60 К). Запропоновано модель взаємозв'язку цих параметрів. Показано, що зі зменшенням відношення висоти гілки термоелемента до площі її поперечного перерізу інтенсивність відмов однокаскадного ТЕП зменшується, а отже, ймовірність безвідмовної роботи збільшується.

Ключові слова: термоелектричний пристрій, геометрія гілки термоелемента, інтенсивність відмов, ймовірність безвідмовної роботи, надійність.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Ащеулов А. А., Даналакий О. Г., Романюк І. С. Термоэлектрические термостатирующие устройства для элементной базы интернет-оборудования. — Черновцы: Издательский дом «Родовід», 2016. — 132 с.

Приведены базовые сведения о существующих методах и устройствах для термостатирования и охлаждения ЭТЭ, рассмотрены особенности их температурных режимов, предложен ряд математических моделей термоэлектрических термостатирующих устройств для нескольких конструкций охлаждающихся приборов.

Использование предложенных устройств и методов позволит повысить надежность аппаратуры связи в экстремальных условиях.

Книга предназначена для инженеров, научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов ВУЗов технического и классического типов.



MODEL OF CORRELATION BETWEEN GEOMETRY
OF THERMOELECTRIC BRANCHES AND RELIABILITY INDICATORS
OF SINGLE-STAGE COOLERS IN $Q_{0\max}$ MODE

The authors consider the influence of the geometry of thermoelectric branches on the performance reliability of single-stage thermoelectric devices (TED) operating at maximum cooling capacity at 2.0 W thermal load for any values of temperature difference (from 10 to 60 K). A model of correlation of these parameters is presented. It is shown that when the ratio of height of a thermoelectric branch to its cross-section area decreases, failure rate of a single-stage TED reduces, and therefore failure-free operation probability increases.

Keywords: thermoelectric device, geometry of thermoelectric branch, failure rate, failure-free operation probability, reliability.

REFERENCES

1. Anatychuk L., Vikhor L., Rozver Yu., Rassamakin B., Khairnasov S., Nikolaienko Yu. Research and development on performances of large-sized thermoelectric module with heat pipes. *Heat Pipe Science and Technology, An International Journal*, 2011, vol. 2, iss. 1-4, pp. 115-120. <http://dx.doi.org/10.1615/HeatPipeScieTech.v2.i1-4.120>
2. Zebarjadi, M. Esfarjani, K., Dresselhaus, M. S., Ren, Z. F., Chen, G. (2012). Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications. *Energy & Environmental Science*, 5 (1), 5147–5162. <http://dx.doi.org/10.1039/c1ee02497c>
3. Nikolaienko Yu., Vikhor L. [Simulation of load characteristics of optimal cascade thermoelectric cooler]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2001, no. 6, pp. 33-35. (Rus)
4. Nikolaienko Yu., Vikhor L. [Effect of heat transmission to the temperature difference in multistage thermoelectric battery]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2002, no. 4-5, pp. 16-18. (Rus)
5. Anatychuk L.I., Vikhor L.N., Nikolayenko Yu.E., Rassamakin B.M., Rozver Yu.Yu. Large-sized thermoelectric cooling module with heat pipes. *Journal of Thermoelectricity*, 2011, no. 1, pp. 50-55.
6. Anatychuk L.I., Vikhor L.N., Rozver Yu.Yu., Nikolaienko Yu.E., Rassamakin B.M., Hairnasov S.M. Research and development on performances of large-sized thermoelectric module with heat pipes. *Proc. of the VIII Minsk International Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources"*, Minsk, Belarus, 2011, vol. 1, pp. 239-242.
7. Ashcheulov A. A., Okhrem V. G., Romanyuk I.S. *Novi termoelektrychni efekty ta elementy* [New thermoelectric effects and elements]. Chernovtsy, Rodovid, 2015. (Rus)
8. Zaikov V. P., Meshcheryakov V. I., Zhuravlev Yu. I. Analysis of reliability improvement possibilities of thermoelectric cooling. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2015, vol. 4, no. 8, pp. 17-25. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.46553> (Rus)
9. Moiseev V. F., Zaykov V. P. [Effect thermoelectric device operating mode to its reliability]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2001, no. 4-5, pp. 30-32. (Rus)
10. Zaykov V. P., Kinshova L. A., Kazanji L. D., Khranova L. F. Forecasting of parameters of reliability two-cascade thermoelectrical cooling device in a mode $Q_{0\max}$. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2009, no. 5, pp. 34-37. (Rus)
11. Zaykov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F. *Prognozirovaniye pokazatelei nadezhnosti termoelektricheskikh okhlazhdayushchikh ustroystv. Kniga 1. Odnokaskadnye ustroystva* [Reliability indicators prediction for thermoelectric cooling devices. Book 1. Single-stage unit]. Odesa, Politehperiodika, 2009, 120 p. (Rus)
12. Zaikov V. P., Meshcheryakov V. I., Gnatovskaya A. A., Zhuravlev Yu. I. Influence of the effectiveness of raw materials on the reliability of thermoelectric cooling devices. Part I: Single-stage TEDs. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2015, no. 1, pp. 44-48. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.1.44> (Rus)
13. Zaikov V. P., Meshcheryakov V. I., Gnatovskaya A. A., Zhuravlev Yu. I. Influence of the effectiveness of raw materials on the reliability of thermoelectric cooling devices. Part I: Two-stage TEDs. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2015, no. 2-3, pp. 34-38. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.34> (Rus)
14. Zaikov V. P., Meshcheryakov V. I., Zhuravlev Yu. I. Selection of parameters combination of thermoelectric materials for development of high-reliability coolers. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2015, vol. 3, no. 8, pp. 4-14. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42474>
15. Zaykov V.P., Meshcheryakov V.I., Zhuravlev Yu. I. Comparative analysis of the main parameters and reliability indicators of single-stage thermoelectric cooling devices while using different combinations of initial materials settings of a similar efficiency. *Refrigeration Engineering And Technology*, 2015, vol. 51, no 4, pp. 37-44. <http://dx.doi.org/10.15673/0453-8307.4/2015.39289>

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

- Болтовец Николай Силович*, канд. физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе, НИИ «Орион», г. Киев
- Глушеченко Эдуард Николаевич*, канд. техн. наук, начальник отдела, НПП «Сатурн», г. Киев
- Евтух Анатолий Антонович*, докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев
- Кондрик Александр Иванович*, ведущий инженер-исследователь, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
- Матвейчук Ярослав Николаевич*, докт. техн. наук, профессор, НУ «Львовская политехника»
- Николаенко Юрий Егорович*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
- Панов Леонид Иванович*, канд. техн. наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет
- Пелешак Роман Михайлович*, докт. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой, Дрогобычский государственный педагогический университет им. И. Франко
- Плаксин Сергей Викторович*, докт. физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт транспортных систем и технологий НАНУ, г. Днепр
- Сафронов Павел Сергеевич*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Сидоренко Владимир Павлович*, канд. техн. наук, нач. отдела, ГП «НИИ микроприборов», г. Киев
- Троцишин Иван Васильевич*, докт. техн. наук, профессор, Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова
- Фаст Владимир Николаевич*, канд. техн. наук, доцент, Национальный университет «Львовская политехника»
-