



ФИЗИКА сериясы
№ 4(80)/2015
Серия ФИЗИКА

ҚАРАҒАНДЫ
УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ

ВЕСТНИК
КАРАГАНДИНСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА



ISSN 0142-0843

ҚАРАҒАНДЫ
УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ
ВЕСТНИК
КАРАГАНДИНСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 0142-0843

ФИЗИКА сериясы
№ 4(80)/2015
Серия ФИЗИКА

Қазан–қараша–желтоқсан
30 желтоқсан 2015 ж.
1996 жылдан бастап шығады
Жылына 4 рет шығады
Октябрь–ноябрь–декабрь
30 декабрь 2015 г.
Издается с 1996 года
Выходит 4 раза в год

Собственник РГП

Қарагандинский государственный университет
имени академика Е.А.Букетова

Бас редакторы — Главный редактор

Е.К.КУБЕЕВ,

академик МАН ВШ, д-р юрид. наук, профессор

Зам. главного редактора

Х.Б.Омаров, д-р техн. наук

Ответственный секретарь

Г.Ю.Аманбаева, д-р филол. наук

Серияның редакция алқасы — Редакционная коллегия серии

К.К.Кусаинов,
Т.А.Кокетайтеги,
Н.Х.Ибраев,
А.О.Саулебеков,
К.М.Арынгазин,
И.В.Брейдо,
Митко Стоев,
С.Д.Джуманов,
М.М.Кидибаев,
З.Ж.Жанабаев,
Г.В.Климушева,
С.Е.Кумеков,
В.М.Лисицын,
И.Н.Огородников,
Г.И.Пилипенко,
С.В.Плотников,
А.Ж.Турмухамбетов,
К.Ш.Шункеев,
Л.В.Чиркова,

редактор д-р техн. наук;
д-р физ.-мат. наук;
д-р физ.-мат. наук;
д-р физ.-мат. наук;
д-р пед. наук;
д-р техн. наук;
д-р PhD (Болгария);
д-р физ.-мат. наук (Узбекистан);
д-р физ.-мат. наук (Кыргызстан);
д-р физ.-мат. наук;
д-р физ.-мат. наук (Украина);
д-р физ.-мат. наук;
д-р физ.-мат. наук (Россия);
д-р физ.-мат. наук (Россия);
д-р физ.-мат. наук;
д-р физ.-мат. наук;
д-р физ.-мат. наук;
д-р физ.-мат. наук;
д-р физ.-мат. наук;
ответственный секретарь
канд. техн. наук

Редактор *И.Д.Рожнова*
Редакторы *Ж.Т.Нұрмұханова*
Техн. редактор *Д.Н.Муртазина*

Издательство Карагандинского
государственного университета
им. Е.А.Букетова
100012, г. Караганда,
ул. Гоголя, 38,
тел., факс: (7212) 51-38-20
e-mail: izd_kargu@mail.ru

Басуға 29.12.2015 ж. қол қойылды.
Пішімі 60×84 1/8.
Офсеттік қағазы.
Көлемі 10,0 б.т.
Таралымы 300 дана.
Бағасы келісім бойынша.
Тапсырыс № 315.

Подписано в печать 29.12.2015 г.
Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная.
Объем 10,0 п.л. Тираж 300 экз.
Цена договорная. Заказ № 315.

Отпечатано в типографии
издательства КарГУ
им. Е.А.Букетова

Адрес редакции: 100028, г. Караганда, ул. Университетская, 28

Тел.: (7212) 77-03-69 (внутр. 1026); факс: (7212) 77-03-84.

E-mail: vestnick_kargu@ksu.kz. Сайт: vestnik.ksu.kz

© Карагандинский государственный университет, 2015

Зарегистрирован Министерством культуры и информации Республики Казахстан.

Регистрационное свидетельство № 13111–Ж от 23.10.2012 г.

МАЗМҰНЫ

КОНДЕНСАЦИЯЛАНҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ

<i>Чиркова Л.В., Ермаганбетов Қ.Т., Аринова Е.Т.</i> Шалаөткізгіштердегі тұрақсыздық және фазалық көшудегі ұқсастық.....	4
<i>Сергеев Д.М., Балмұхан И.Н.</i> Шашырау матрицасы негізінде барьердің салыстырмалы биіктігі $h_b = 3$ тең асқын өткізгіш туннельдік ауысымның вольтамперлік сипаттамасын есептеу туралы.....	12
<i>Смагулов Д.У., Белов Н.А., Достаяева А.М.</i> Al-0,5%Zr қорытпаларының электр кедергісіне күйдірудің әсері.....	19
<i>Лауринас В.Ч., Сыздыкова А.Ш., Еремин Е.Н., Гученко С.А., Юров В.М.</i> Қоспалы болат қабыршақтарының тотығу тұрақтылығы және қызғуға төзімділігі.....	24

ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ

<i>Бакланов А.Е., Григорьева С.В., Яковлев А.Н.</i> Математикалық модельдеудің жылу массасын тасымалдау жүйесіндегі жоғарғы қуатты жарық диодының бөлінуі.....	31
<i>Шуишбаева Н.Н., Құсайынов К., Стоев М., Шаймерденова К.М., Оспанова Д.А., Ахмадиев Б.А., Саденова К.К.</i> U-тәрізді жер асты жылу алмастырғыштары маңындағы температураның өзгерісін зерттеу.....	39

АСПАПТАР ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТ ТЕХНИКАСЫ

<i>Зейниденов А.К., Ибраев Н.Х., Айтбаева Ж.М.</i> Анодтау әдісімен нанокұрылымдық кеуекті оксид алюминийді алуға арналған техникасын және әдісін әзірлеу.....	43
<i>Ибраев Н.Х., Афанасьев Д.А., Сериков Т.М., Аманжолова Г.С.</i> Кеуекті титан диоксидін синтездеу үшін магнетронды тозандандыру әдісімен титан қабыршақтарын алу.....	48

ТЕХНИКАЛЫҚ ФИЗИКА

<i>Айкеева А.А., Жаутиков Б.А., Роговая К.С., Жаутиков Ф.Б., Мухтарова П.А.</i> Электромагниттік көтергіш қондырғысының «скип-бағыттаушы құрылғы» жүйесін зерттеу.....	57
<i>Молнар А.А., Куритник И.П., Герасимов В.В., Карабекова Д.Ж.</i> «Адам-кіім» жүйесінде портативті электронды құрылғылар үшін пьезоэлектрлікті электр энергиясы көзі ретінде пайдалану.....	62

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

<i>Chirkova L.V., Ermaganbetov K.T., Arinova E.T.</i> Electronic mechanisms of instability in semiconductor structures.....	4
<i>Сергеев Д.М., Балмұхан И.Н.</i> О расчете вольтамперной характеристики сверхпроводящего туннельного перехода на основе матрицы рассеяния при относительной высоте барьера $h_b = 3$	12
<i>Smagulov D.U., Belov N.A., Dostayeva A.M.</i> Roasting effect on the electrical resistivity of the Al-0,5%Zr alloys.....	19
<i>Laurinas V.Ch., Syzdykova A.Sh., Eremin E.N., Guchenko S.A., Yurov V.M.</i> High-temperature strength and corrosion resistance of alloy steel coatings.....	24

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

<i>Бакланов А.Е., Григорьева С.В., Яковлев А.Н.</i> Математическое моделирование тепломассопереноса в системе теплоотвода для светодиода высокой мощности.....	31
<i>Shuyushbayeva N.N., Kussaiynov K., Stoev M., Shaimerdenova K.M., Ospanova D.A., Akhmadiev B.A., Sadenova K.K.</i> Study of regularities of changes in the temperature near the U-shaped ground heat exchangers.....	39

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

<i>Зейниденов А.К., Ибраев Н.Х., Айтбаева Ж.М.</i> Разработка техники и методики получения наноструктурированного пористого оксида алюминия методом анодного окисления.....	43
<i>Ибраев Н.Х., Афанасьев Д.А., Сериков Т.М., Аманжолова Г.С.</i> Получение пленок титана методом магнетронного распыления для синтеза пористых пленок диоксида титана.....	48

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

<i>Айкеева А.А., Жаутиков Б.А., Роговая К.С., Жаутиков Ф.Б., Мухтарова П.А.</i> Исследование системы «скип-направляющее устройство» электромагнитной подъемной установки.....	57
<i>Молнар А.А., Куритник И.П., Герасимов В.В., Карабекова Д.Ж.</i> Пьезоэлектричество как источник электроэнергии для портативных электронных устройств в системе «человек-одежда».....	62

ФИЗИКАНЫ ОҚЫТУ ӘДІСТЕМЕСІ

Карбозова А.К., Маханов К.М., Мустафина А.М., Маукебаева М.А. NXT-технологиясын мектепте робототехника негіздерін меңгеру үшін қолдану 66

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ МӘЛІМЕТТЕР 73

2015 жылғы «Қарағанды университетінің хабаршысында» жарияланған мақалалардың көрсеткіші. «Физика» сериясы 75

МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИКИ

Карбозова А.К., Маханов К.М., Мустафина А.М., Маукебаева М.А. Применение NXT-технологий в преподавании школьного курса физики 66

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 73

Указатель статей, опубликованных в «Вестнике Карагандинского университета» в 2015 году. Серия «Физика» 75

КОНДЕНСАЦИЯ ЛАНҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

UDC 621.383: 537.311.33

L.V.Chirkova¹, K.T.Ermaganbetov¹, E.T.Arinoва²

¹*Ye.A.Buketov Karaganda State University;*

²*Gimnasium № 1, Karaganda*

(E-mail: ket3853@mail.ru)

Electronic mechanisms of instability in semiconductor structures

Semiconductor crystals are difficult dynamic systems in which emergence of electric not stability is possible (failure of current, spontaneous fluctuations of current or tension, switching and a hysteresis in volt — the ampere characteristic, etc.). This instability meets in many materials, in different temperature areas and at various levels of excitement. In article instability of some branches of volts — the ampere characteristic of semiconductor devices — existence of the negative differential conductivity (NDC) of S-and N-of types is considered. It is shown that NDC are connected with not stability operated by tension or current. The main electronic mechanisms resulting in negative differential conductivity are considered.

Key words: a semiconductor crystal, instability, negative differential conductivity, volt — the ampere characteristic.

The semiconductor which is under strong external influence finds essential nonlinear behavior: emergence of considerable deviations from a linear ratio between current and tension (violation of the law of Ohm), emergence of not stability is possible (interruptions of current, fluctuation and a gallop of current switching and a hysteresis in the volt-ampere characteristic, etc.).

Big electric and magnetic fields, high level of current injection and light excitement can be external influences.

Listed above instability meet in many materials, in different temperature areas, at various levels of excitement [1–3]. Often they have negative impact on characteristics of semiconductor devices, but in certain cases they are used for the special purposes. For example, for generation of microwave radiation in the range from 0,1 to 1000 GHz, for strengthening in the gigahertz range of frequencies i.e. where ordinary transistors can't be used [3, 4].

It is known that the volt-ampere characteristic of the $I(U)$ semiconductor which is measured in stationary conditions, most fully reflects nature of transfer of carriers of a charge. This characteristic depends on microscopic properties of volume of the semiconductor. These properties define dependence of density of current of j on local electric field E and from parameters of contacts. It is often possible to be limited to a local static scalar product of $j(E)$.

If dependence of $j(E)$ has area of the negative differential conductivity (NDC)

$$\sigma_{\text{оуфф}} = \frac{dj}{dE} < 0, \quad (1)$$

that is, if density of current decreases with growth of electric field (or increases at reduction of a field), respectively stationary states will be unstable. In this case the size of current will depend on other chain which part even in the absence of external load resistance resistive and jet elements surely are (resistance and inductance of wires, mutual inductance and capacity).

Depending on what of letters of the Latin alphabet — N or S — reminds the form of the characteristic of $j(E)$, distinguish NDC N -or S -of type. The characteristic type of the specified characteristics is given in figure 1.

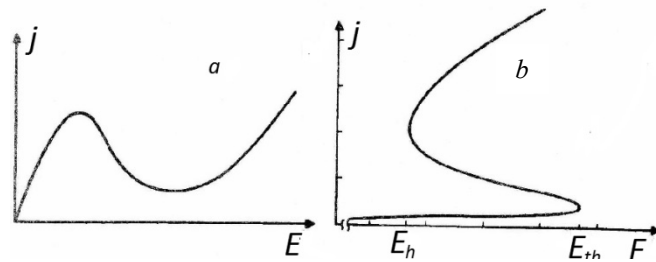


Figure 1. Dependences of $j(E)$ for NDC of N -type (a) and S -type (b)

The tunnel diode and Gunn diode belong to devices with NDC N -of type. The avalanche-transit (ATD) diode, multilayered devices such as thyristor, as p-n-p-n and p-i-n-diodes, thermal and electro thermal switches, switches on elements Ovshinsky ovonic memory in the type NDC S -type.

NDC N - and S -of types are connected with instability which voltage or current. In case of density NDC N -of current is single valued function of a electric field. Thus it is necessary to consider that the electric field is ambiguously: the $E(j)$ function in a certain area of values j has treble coursing [4]. The case of NDC S -of type is complementary, i.e. E and j are interchanged the position. NDC N - and S -of types are connected with instability which voltage or current. In case of density NDC N -of current is single valued function of a electric field. Thus it is necessary to consider that the electric field is ambiguously: the $E(j)$ function in a certain area of values j has treble coursing [4, 5]. The case of NDC S -of type is complementary, i.e. E and j are interchanged the position.

Also combinations of NDC N - and S -of types are possible: they can replace each other on the static characteristic at increase of electric field; perhaps eventually transformation of the characteristic from S -figurative in N -figurative; at last, the static characteristic can have more difficult form, with a complex shapes of current and tension. Also combinations of NDC N - and S -of types are possible: they can replace each other on the static characteristic at increase of electric field; perhaps eventually transformation of the characteristic from S -figurative in N -figurative; at last, the static characteristic can have more difficult form, with a complex shapes of current and tension.

The volt — the ampere characteristic of the semiconductor can be calculated, using dependence of j from E , having carried out integration of density of current of j on the flow area s and a field E on testing length:

$$I = \int j ds; \quad (2)$$

$$U = \int_0^{l_z} E(z) dz. \quad (3)$$

In distinction from dependence of $j(E)$ which is defined by properties of volume of semiconductor material, volt — ampere characteristic of $I(U)$ depends also on geometry of a sample, boundary conditions and contacts. However, if the steady state spatially is uniform and resistance of contacts can be neglected in comparison with semiconductor volume resistance, dependences of $j(E)$ and $I(U)$ are similar, i.e. can be reduced to one curve by change of scale.

As a rule, NDC connect with instability of a uniform steady state in relation to spatial fluctuations of electric field and concentration of carriers that leads to spatially non-uniform distributions of density of current or field [1, 4]. Thus the usual thermodynamic explanation of such spatial structures is unsuitable as NDC comes when the system is taken far away from a condition of thermal balance.

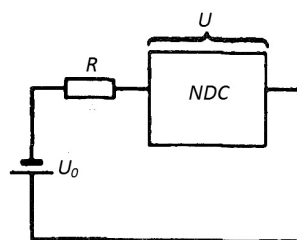


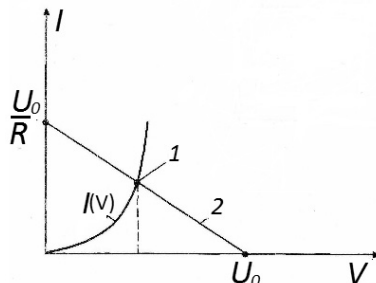
Figure 2. A chain with NDC-an element

The example of the elementary chain with the element having NDC is given in figure 2. NDC – an element is included consistently with the load resistor R and a source of tension.

The load line of an element has an appearance (fig. 3)

$$I = \frac{(U_0 - U)}{R} \tag{4}$$

Crossing of a load straight line about BAX of the device defines a working point on a direct current. Working points at a negative differential indicator of $dI/dU < 0$ often are unstable in relation to heterogeneity of a spatial charge (formation of non-uniform distribution of a field or density of current) and in relation to emergence of the oscillations determined by an external chain.



1 — working point, 2 — a load line on a direct current

Figure 3. Dependence of current on tension on an element with NDC

By the form characteristics of $I(U)$ and to position of the load line can be made the following general conclusions. In case of N -or S -of the figurative characteristic of $I(U)$ three points of intersection of the characteristic of $I(U)$ and the load line are possible. At change of the enclosed tension the load line is displaced parallel to itself and points of intersection move according to the characteristic of $I(U)$. When the load line is tangent to the characteristic, there is a merge of two points of intersection, and at further change there will be a point of intersection — bifurcation of the elementary type. Generally bifurcations are closely connected with loss or change of stability of branches of various decisions.

In the case under consideration it means that one of two merging points of intersection is steady, and another is unstable though in both cases the differential indicator is negative.

Negative differential conduction is shown via mechanisms which are defined by p-n-properties of transition, and the phenomena in volume of the semiconductor. These mechanisms are realized in many semiconductor devices (tunnel diodes, diodes Gunn, avalanche-transit diode, etc.). So, in the tunnel diode and in p-n-p-n-the diode NDC mechanisms are caused by the phenomena in p-n-transition.

Operation of the tunnel diode and the mechanism of emergence of type ODP N -in it are in detail considered by authors in [6].

In p-n-p-n-the diode S -the figurative characteristic of $I(U)$ is realized. This device has four-layer structure. Many p-n-p-n-options of structure, including a thyristor or the operated semiconductor rectifier are known. The elementary four-layer structure (a dynistor, a diode thyristor or Shockley diode) consists of three consecutive p-n-of transitions and two ohmic — the anode and the cathode (fig. 4).

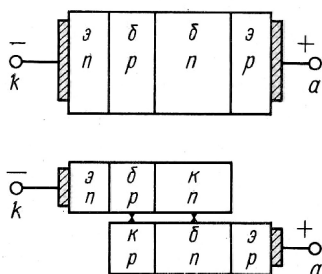


Figure 4. Structure of the Shokley diode

When giving on Shokley diode of direct tension it can be in two steady states: closed and opened. Extreme p-n-transitions are displaced thus in the direct direction (optical transitions), average p-n-transition

is displaced in the opposite direction (collector transition). The closed condition of a dynistor corresponds to a site of a direct branch BAX between a zero point and a point of switching (fig. 5, site 1 to CVC). The point of switching is a point to CVC in which differential resistance is equal to zero, and tension on a dynistor reaches the maximum value. The open condition of a dynistor corresponds to a low-voltage and low-impedance site of a direct branch CVC (fig. 5, site 2 to CVC). Between sites 1 and 2 of volts — the ampere characteristic there is transitional a site corresponding to an unstable condition of structure.

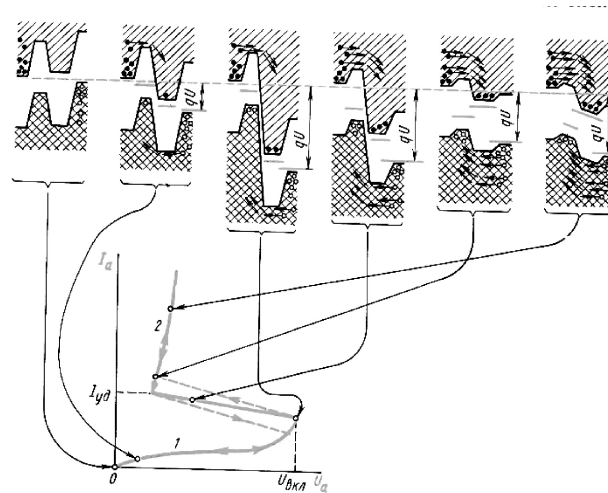


Figure 5. BAX and power charts of Shokley diode (diode thyristor)

The most part of external direct tension falls on collector transition therefore the first site of a direct branch BAX of the Shokley diode is similar to the return branch BAX of the rectifier diode (fig. 5, a site 1 BAX). With increase in the anode tension enclosed between the anode and the cathode direct tension and on emitter transitions increases. The electrons injected from emitter n-in p-base diffuse to collector transition, are involved by a field of collector transition and get to n-base (fig. 5). Further advance of electrons on structure is interfered by a small potential barrier of the right emitter transition. Therefore, part of electrons, having appeared in a potential hole of n-of base, forms an excess negative charge which, lowering height of a potential barrier of the right emitter transition, causes increase in injection of holes from emitter p-in n-base.

The injected holes diffuse to collector transition, are involved by a field of collector transition and get to p-base. Their further advance on structure of the diode is interfered by a small potential barrier of the left emitter transition now. Thus, in p-to base there is an accumulation of an excess positive charge that promotes increase in injection of electrons from emitter n-.

Thus, when giving on p-n-p-n-the diode as whole direct tension two states are possible: with low conductivity (the small size of current is I) and with high conductivity (big size I). In the first case on extreme (optical) transitions direct shift, and on average (collector) transition — blanking offset. In the second case distribution of potential in the device is nonmonotonic dependence and such that on all three transitions shift direct, i.e. unlocking. S -the figurative characteristic of the $I(V)$ is as a result formed.

Lead 4 main mechanisms to emergence of NDC determined by properties of volume. The nonmonotonic dependence of density of current of j on a field E leading to a negative differential conductans in some range E can be caused by nonlinearity of mobility, concentration of carriers of a charge, temperature of electrons or temperatures of a lattice [3, 4].

There are some types of nonlinearity of mobility or drift instability: Gunn, and instability, Bragg scattering on border Brillouin zone. Gunn nonlinearity of mobility is used in Gunn diode for generation and strengthening of the Microwave radiation frequencies over 1 GHz. NDC mechanism in this case is based on intervalley electron transfer from a state with high mobility in a state with low mobility under the influence of strong electric field ($E > 3 \text{ Sq/s}$). As material for production of semiconductor devices with similar structures, connections $A^{III}B^V$, in particular, GaAs gallium arsenide serve. The schematic image of zonal structure of GaAs is given in figure 6.

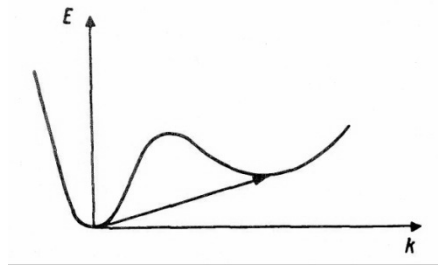


Figure 6. Zonal structure of a zone of conductivity of GaAs

In weaker electric field almost all electrons are in the main minimum where the effective mass of m^* is small ($m^* \approx 0,07m_0$, m_0 - the mass of an electron). Therefore, their mobility is great. At increase in a field E electrons "are warmed" and gain the energy sufficient for transition to the side valley with higher energy in a minimum, but with a bigger effective weight and, therefore, with lower mobility. In process of transition of the increasing number of electrons their average mobility sharply decreases, the current density determined by expression $j = en\mu(E)E$ also decreases. Negative differential mobility results. When the majority of electrons appears in the side valley, j will start increasing again. Thus the characteristic with type NDC N -turns out. Other NDC mechanisms connected with nonlinearity of mobility are caused by anisotropy of equivalent side valleys.

Other NDC mechanisms connected with nonlinearity of mobility are caused by anisotropy of equivalent side valleys. For example, Erlbah instability in Ge is caused by not diagonal elements of a tensor of differential conductivity. Other NDC mechanisms connected with nonlinearity of mobility are caused by anisotropy of equivalent side valleys. For example, Erlbah instability in Ge is caused by not diagonal elements of a tensor of differential conductivity dj_α / dE_β .

Let there is a case of two equivalent side valleys 1 and 2 which axes of anisotropy have the different directions. Electric field E is enclosed in the direction x , symmetric concerning these two valleys. Then j current will also be directed lengthways x . Further we will assume that the field slightly deviates the direction x so effective weight for conductivity in the valley 1 will exceed that in the valley 2. Speed with which electrons absorb energy of electric field (speed of a warming up of electrons) is inversely proportional to effective weight for conductivity. Therefore in the valley the 2nd electrons will be warmed more strongly, than in the valley 1. By means of intervalley dispersion electrons will pass from hotter valley (the valley 2) in colder (the valley 1) and in the valley of 1 electrons will become more, than in the valley 2. Reduction of filling of the valley with higher mobility will lead to a negative contribution to current in the direction of y that can result in cross negative conductivity (type NDC N).

Generative recombinational instability (instability GR) or instability caused by nonlinearity of concentration of carriers of a charge are characterized by nonlinear dependence of concentration of carriers in a steady state from a field E . It results in nonmonotonic dependence of density of current on a field with NDC N -or S -of types. Such dependence is caused by redistribution of electrons between a zone of conductivity and the connected states in the course of a warming up of electronic gas.

GR — coefficients usually depend on electric field. Especially strong dependence takes place for increase in section of capture of carriers by the impurity centers with growth of a field and for processes of shock ionization of carriers from impurity levels.

Capture of electrons on deep impurity levels demands overcoming of a Coulomb potential barrier by them. Therefore the coefficient of capture increases with a field E . and concentration of free carriers decreases with growth of a field, $dn/dE < 0$, and differential conductivity equal $dj/dE = e\mu(n + Edn/dE)$ can become negative. In stronger fields the coefficient of ionization increases, and concentration of carriers starts growing with a field. It results in positive differential conductivity. So there is N -figurative $j(E)$ the characteristic. Also shock ionization of carriers from impurity levels (small donors or deep traps) or ionization (avalanche breakdown) can lead to ODP. If the free carrier of current received sufficient kinetic energy in electric field, it can give this energy at collision to the connected carrier. The last then gets to a conductivity zone (electron) or to a valent zone (hole). As a result there is one more free carrier which can make one more act of shock ionization in turn. The fast increase in concentration of free carriers is as a result observed. In the electric fields exceeding threshold values for, necessary for a warming up of carriers to the energy suffi-

cient for ionization, the coefficient of shock ionization sharply increases with growth of a field E . Under certain conditions such processes can lead to type NDC S [7, 8].

The phenomena in volume of the semiconductor leading to NDC are the cornerstone of the avalanche and flying diode and p-i-n-of the diode.

P-i-n-the diode consists of a layer of the not alloyed semiconductor material concluded between layers of p-and n-of types (fig. 7). The majority of switching microwave radiation — diodes has similar structure. If n-a layer of the diode to connect to minus, and p-a layer — to tension source plus, electrons will be injected to the center with own conductivity (i-a layer). Let's say that i-a layer contains the deep centers of a recombination of acceptor type with the big cross section of capture for holes and considerable the smaller section of capture for electrons. Besides, we will assume that in a condition of thermal balance these centers are completely occupied with electrons. Then at the low level of injection for holes there will be «a recombination barrier»: the most part of the injected holes will be taken the recombination centers near injecting transition p-i-. The injected electrons thus will freely pass i-a layer.

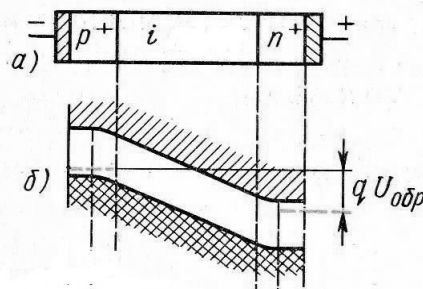


Figure 7. The diode with p-i-n-structure (and) and its power chart

Resultant current of electrons is limited to the volume charge formed by the injected electrons. If concentration of the injected electrons and holes exceeds concentration of the centers of a recombination, i.e. at the high level of injection, on each center of a recombination there is a taken hole, and excess holes just as electrons pass i-a layer. At rather high level of injection of concentration of electrons and holes are approximately identical. In this case current is transferred by quasineutral electronic hole plasma.

Thus, at this size of the enclosed tension two steady stationary states are possible. The first is characterized by the small size of current, thus the recombination centers are occupied with electrons, and current is created by carriers of one sign and is limited by a spatial charge. The second is a state with big current. In this case the recombination centers are filled with holes, and current is caused by the injected plasma. In intermediate states there is NDC.

Avalanche-transit diodes have structure $p^+ - n - n^+$ (fig. 8). They work in the mode of avalanche reproduction of carriers of current at the return shift of electric transition having constant and variable components.

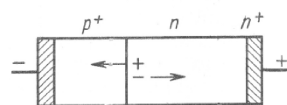


Figure 8. Structure of avalanche-transit diode

When total tension exceeds penetrative, shock ionization — avalanche breakdown begins. Electron-hole couples generated in narrow part of p-n-of transition where intensity of electric field is sufficient for shock ionization are divided by a field. The current caused by the movement of new carriers passes through structure until these carriers don't go beyond transition p-n-.

If to impose an alternating voltage on continuous return shift, emergence of a negative variable conductance if the part of carriers drifts against variation electric field is possible. It corresponds to delay of a phase of current on a corner π concerning tension.

Increase of tension all the time will be followed by reduction of current, and reduction of tension — current growth. It testifies that for this frequency of an alternating voltage during the entire period of fluctuations the condition of a negative conductance is satisfied.

At reduction in the frequency of an alternating voltage current will lag behind tension on a corner, smaller π as time of flight and a lag effect of shock ionization don't change. When with reduction in the frequency of an alternating voltage phase shift between current and tension makes $\pi/2$, conditions of a negative conductance will be satisfied only throughout a half of the period, alternating through everyone a quarter of the period with conditions of positive differential resistance. In this limit case on average for the period the avalanche and flying diode won't possess a negative conductance. Thus, in case of avalanche and flying diodes the combination of the effects connected with shock ionization and final time of flight of carriers works.

All mechanisms of emergence of ODP considered in article are purely electronic, based on violation of balance in system of carriers by electric field. At the same time it should be noted that there is rather big variety electro thermal, the ODP acoustoelectric mechanisms, mechanisms connected with instability of the magnetized plasma, etc. which consideration is beyond this article.

References

- 1 Шёлль Э. Самоорганизация в полупроводниках. Неравновесные фазовые переходы в полупроводниках, обусловленные генерационно-рекомбинационными процессами / Шёлль Э. — М.: Мир, 1991.
- 2 Аскеров Б.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. — М.: Наука, 1985.
- 3 Бонч-Бруевич В.Л., Звягин И.П., Миронов А.Г. Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках. — М.: Наука, 1972.
- 4 Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. — Л.: Наука, 1978.
- 5 Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. — М.: Высш. шк., 1987.
- 6 Chirkova L., Ermaganbetov K.T., Arinoва E.T. Instability in the semiconductor structures as self-organization manifestation // Education and science without borders. — 2013. — Vol. 4. — No 7 (1/2013). — P. 132–134.
- 7 Пожела Ю.К. Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках. — М.: Наука, 1977.
- 8 Zhanabaev Z.Zh. Information Properties of self-organizing Systems // NewsNat.Acad. of Science RK. — 1996. — № 5. — P. 14–19.

Л.В.Чиркова, К.Т.Ермаганбетов, Е.Т.Аринова

Шалаөткізгіш құрылымдарындағы орнықсыздықтардың электрондық табиғаты

Шалаөткізгіш кристалдар өте күрделі динамикалық жүйе болғандықтан, оларда әр түрлі электр орнықсыздықтар (токтың кенеттен жоғалуы, ток пен кернеудің өз бетімен тербелісі, вольт-амперлік сипаттамаларда гистерезистің пайда болуы т.б.) пайда болуы мүмкін. Орнықсыздықтар көпшілік материалдарда әр түрлі температура аралығында, әр түрлі қоздырғыштардың әсерінен туындайды. Мақалада шалаөткізгіш құралдарының вольт-амперлік сипаттамаларының тармақтарында орнықсыздықтардың пайда болатындығы — S- және N-тектес теріс дифференциациялық өткізгіштіктердің пайда болатындықтары зерттелген. Теріс дифференциациялық өткізгіштіктің пайда болуы кернеу мен токқа тәуелді орнықсыздықтарға тәуелді болатындығы көрсетілген. Теріс дифференциациялық өткізгіштіктің пайда болуына әкелетін электрондық тетіктер қарастырылған.

Л.В.Чиркова, К.Т.Ермаганбетов, Е.Т.Аринова

Электронные механизмы неустойчивостей в полупроводниковых структурах

В статье отмечено, что полупроводниковые кристаллы являются сложными динамическими системами, в которых возможно возникновение электрических неустойчивостей (срыв тока, спонтанные колебания тока или напряжения, переключение и гистерезис в вольт-амперной характеристике и т.д.). Эти неустойчивости встречаются во многих материалах, в разных температурных областях и при различных уровнях возбуждения. Авторами рассмотрена неустойчивость некоторых ветвей вольт-амперной характеристики полупроводниковых приборов — наличие отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) S- и N-типов. Показано, что ОДП связаны с неустойчивостями, управляемыми напряжением или током. Рассмотрены основные электронные механизмы, приводящие к отрицательной дифференциальной проводимости (кондактансу).

References

- 1 Schoell E. *Self-organization in semiconductors. Nonequilibrium phase transitions in semiconductors due to generation-recombination processes*, Moscow: Mir, 1991.
- 2 Askerov B.M. *The electronic phenomena of transfer in semiconductors*, Moscow: Nauka, 1985.
- 3 Bonch-Bruyevich V.L., Zvyagin I.P., Mironov A.G. *Domain electric instability in semiconductors*, Moscow: Nauka, 1972.
- 4 Anselm A.I. *Introduction to the theory of semiconductors*, Leningrad: Nauka, 1978.
- 5 Pasyukov V.V., Chirkin L.K. *Semiconductor devices: Studies for higher education institutions*, Moscow: Vysshaya shkola, 1987.
- 6 Chirkova L., Ermaganbetov K.T., Arinova E.T. *Education and science without borders*, 2013, 4, 7 (1/2013), p. 132–134.
- 7 Pozhela Yu.K. *Plasm and current instability in semiconductors*, Moscow: Nauka, 1977.
- 8 Zhanabaev Z.Zh. *News National academy of Sciences Russian academy*, 1996, 5, p. 14–19.

Д.М.Сергеев^{1,2}, И.Н.Балмухан²¹Военный институт Сил воздушной обороны, Актюбе;²Актюбинский региональный государственный университет им. К. Жубанова
(E-mail: serdau@rambler.ru)**О расчете вольт-амперной характеристики сверхпроводящего туннельного перехода на основе матрицы рассеяния при относительной высоте барьера $h_b = 3$**

В рамках теории квантовых транспортных явлений с применением метода матрицы рассеяния рассчитаны вольт-амперные характеристики и $dI(V)/dV$ -спектры дифференциальной проводимости сверхпроводящих туннельных переходов при относительной высоте барьера $h_b = 3$. Показана эволюция транспортных характеристик джозефсоновского перехода с изменением сверхпроводящей щели (параметра порядка) от $0,1 \div 1$ усл. ед. В рассматриваемом случае влияние температуры на переход модельно изучено варьированием значения параметра порядка массивного сверхпроводника в диапазоне $0,1 \div 1$ усл. ед., так как относительная прозрачность барьера перехода постоянная ($D = 0,1$).

Ключевые слова: сверхпроводимость, туннельный переход, эффект Джозефсона, вольт-амперная характеристика, спектры динамической проводимости, высота барьера.

Введение

В настоящее время для создания и реализации сверхчувствительных приемных устройств миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн интенсивно используются и исследуются джозефсоновские туннельные переходы, состоящие из чередования сверхпроводящего материала и тонкого слоя диэлектрика ~ 2 нм (superconductor — insulator — superconductor (SIS)) [1–3]. Высокая нелинейность электрических характеристик таких SIS-переходов относительно других типов сверхпроводящих слабых связей (например, переходов с непосредственной проводимостью, точечных контактов, мостиковых структур и др. [4, 5]) позволила создать приемные устройства, предельная чувствительность которых ограничена квантовым пределом [1].

Обычно вольт-амперные характеристики (ВАХ) таких SIS-переходов рассчитываются наиболее простыми способами, например, рассмотрением джозефсоновской структуры как эквивалентного электрического колебательного контура с учетом туннелирующего джозефсоновского тока [4]. Также легче рассчитать ВАХ идеальных туннельных переходов с нулевой прозрачностью барьера $D = 0$. Для расчетов подобных характеристик идеальных туннельных переходов на основе низкотемпературных сверхпроводников успешно применяется микроскопическая теория сверхпроводимости Бардина–Купера–Шриффера (БКШ) (рис. 1) (см., напр., [6]), а также приближенный расчет ВАХ можно произвести, применяя квазичастичную функцию Крамерса–Кронинга (рис. 2) [3] либо используя кусочно-линейную аппроксимацию [7].

Особый интерес представляет случай, когда прозрачность барьера принимает околонулевое значение, но $D \neq 0$. Прозрачность барьера определяется следующим выражением:

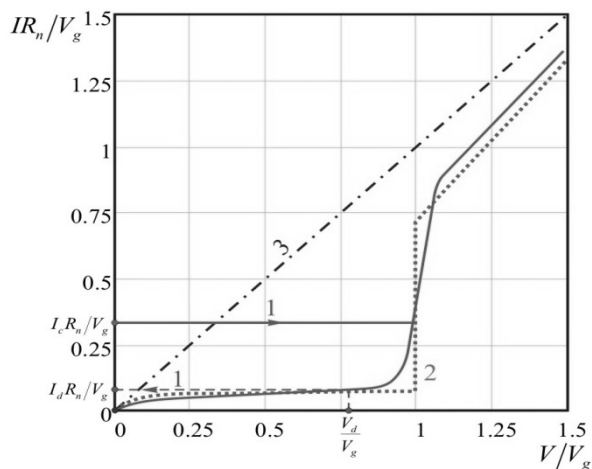
$$D(h_b) = |T|^2 = \left| \frac{1}{1 + j \cdot h_b} \right|^2, \quad (1)$$

где $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица; h_b — высота барьера.

На рисунке 3 представлена зависимость функции $T(h_b) = \frac{1}{1 + j \cdot h_b}$, определяющая прозрачность барьера $D(h_b) = |T|^2 = \text{Re}[T(h_b)]$. При значении высоты барьера $h_b = 3$ прозрачность принимает значение $D = 0,1$, соответственно вещественная часть функции $\text{Re}[T(3)] = D(3) = 0,1$, а мнимая часть функции $\text{Im}[T(3)] = -0,3$ (рис. 3).

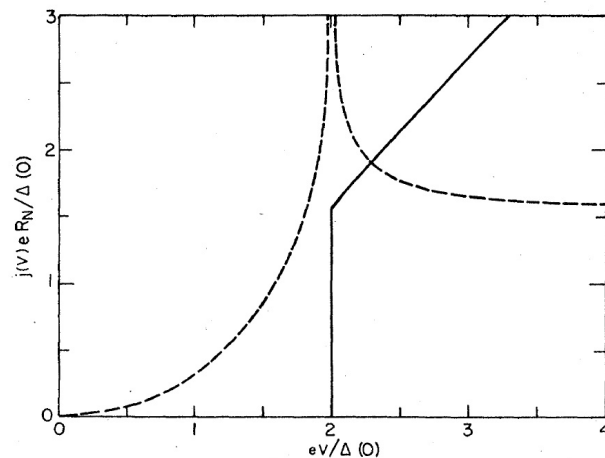
В рассматриваемом случае вероятность наблюдения андреевского отражения мала, и в основном работает туннельный механизм транспорта квазичастиц.

В данной работе показан расчет вольт-амперной характеристики и ее производных (дифференциальная проводимость) сверхпроводящего туннельного перехода на основе матрицы рассеяния при относительной высоте барьера $h_b = 3$ (прозрачность $D = 0,1$).



1 — типичная ВАХ SIS-перехода;
2 — рассчитанная в рамках теории БКШ для идеального SIS-перехода; 3 — омическая зависимость $I = V/R_n$ (для сравнения)

Рисунок 1. ВАХ сверхпроводящего туннельного перехода



Сплошная линия — вещественная часть; пунктирная линия — мнимая часть квазичастичной функции Крамерса–Кронинга [3]

Рисунок 2. ВАХ идеального туннельного SIS перехода по Крамерс-Кронингу

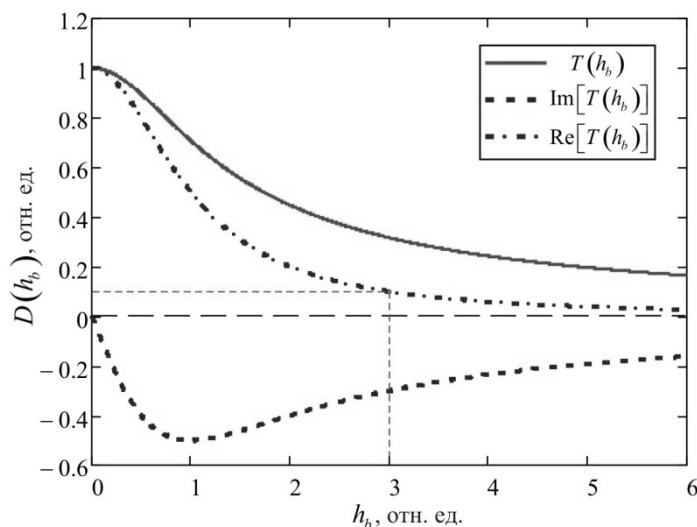


Рисунок 3. Зависимость прозрачности барьера от высоты барьера

Основные уравнения

В известных работах Ландауэра–Бьюттикера (Landauer–Buttiker) [8–11] предложен подход по определению транспортных свойств мезоскопических объектов. Основа подхода состоит в том, что процесс протекания тока рассматривается как процесс рассеяния. Мезоскопический образец соединен с макроскопическими контактами, выполняющими роль электронных резервуаров. Известно, что при низких температурах квазичастица, двигаясь из одного резервуара в другой, при этом сохраняет фазовую когерентность. Сохранение фазовой когерентности позволяет описать взаимодействие квазичастицы с образцом с помощью эффективного потенциала. Квазичастица, рассеиваясь на эффективном потенциале, либо отражается в первый резервуар (резервуар, из которого она пришла), либо проходит в другой резервуар, в результате вносит вклад в ток. В рамках подхода Ландауэра–Бьюттикера центральным объектом, характеризующим транспортные свойства образца, является его

матрица рассеяния, представляющая матрицу величин, описывающих процессы перехода квантово-механических систем из одних состояний в другие при их взаимодействии (рассеянии) [12].

В работе [13] для расчета ВАХ контактов с непосредственной проводимостью типа сверхпроводник (S) — нормальный металл (N) — сверхпроводник, в котором перенос сверхпроводящих пар электронов через потенциальный барьер между двумя сверхпроводниками происходит благодаря когерентному процессу многократных андреевских отражений (MAR — multiple Andreev reflections) [14], применялась матрица рассеяния для электроноподобных S_{el} и дырочноподобных S_h квазичастиц следующего типа [15]:

$$S_{el} = \begin{pmatrix} r & T \\ T & -r^* T/T^* \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$S_h = S_{el}^*, \quad (3)$$

где $|r|^2 = R$ — вероятность отражения.

Джозефсоновский ток можно выразить через амплитуду андреевского отражения электронной квазичастицы и получить в андреевском приближении выражения для определения ВАХ:

$$I_k = \frac{e}{\pi\hbar} \left[eV\delta_{k0} - \int d\varepsilon \tanh\left\{\frac{\varepsilon}{2T}\right\} (J(\varepsilon)(a_{2k}A_k^* + a_{-2k}A_{-k})) + \sum_n (1 + a_{2k}a_{2(n+k)}^*) (A_n A_{n+k}^* - B_n B_{n+k}^*) \right], \quad (4)$$

где e — заряд электрона; \hbar — постоянная Планка; V — напряжение; ε — энергия квазичастицы; $J = \sqrt{1 - |a|^2}$, a — коэффициент андреевского отражения; A, B — амплитуды вероятностей андреевски и нормально отраженных квазичастиц.

Расчет ВАХ производился на основе формулы (4). Программа для вычисления ВАХ разработана в среде Wolfram Mathematica. Следует отметить, что расчет одной кривой ВАХ производился в течение 4–6 часов при использовании четырехъядерного процессора Intel(R) Core(TM) i5-3450 (3,10 GHz). Дифференцирование ВАХ осуществлялось с помощью программы Mathcad путем импортирования данных численного расчета ВАХ. Для максимального предотвращения «ложных пиков» на $dI(V)/dV$ -спектрах дифференциальной проводимости, формирующихся от цифрового шума компьютера, при вычислении ВАХ увеличили количество расчетных точек до 1200÷1400.

Для учета влияния температуры на ВАХ рассматриваемого перехода использовали известную зависимость ширины энергетической щели от температуры из теории БКШ [16]:

$$\Delta_0 = 3,2k_B T_c \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{1/2}, \quad (5)$$

где k_B — постоянная Больцмана; T_c — критическая температура; T — текущая температура образца. Таким образом, в рассматриваемом случае влияние температуры на ВАХ и на спектры динамической проводимости изучено варьированием значения параметра порядка массивного сверхпроводника в диапазоне 0,1÷1 усл. ед. (например, параметр порядка примет значение $\Delta = 1$, когда $T \rightarrow 0$ К и ослабляется при температуре $T \rightarrow T_c$).

Результаты расчетов ВАХ и дифференциальной проводимости сверхпроводящего туннельного перехода на основе матрицы рассеяния при относительной высоте барьера $h_b = 3$ приведены на рисунках 4, 5, соответственно.

Результаты и обсуждения

Известно, что ВАХ туннельных структур при нулевой прозрачности барьера $D = 0$ имеет вертикальные участки из-за обнуления значения тока при щелевом напряжении $V = V_g = \frac{\Delta}{2e}$. Резкое уменьшение тока при нормированном щелевом напряжении $eV_g/\Delta \approx 2$ усл. ед. наблюдается и в нашем случае, однако величина тока равняется нулю только при интервале $0 \leq eV/\Delta < 1$ усл. ед., т.е.

при $eV < \Delta$. При уменьшении значения сверхпроводящей щели Δ от 0,9 до 0,1 в рассматриваемом диапазоне $eV/\Delta < 1$ усл. ед. обнуления тока не происходит, а ВАХ приближается к классической омической зависимости $I(V) = \frac{V}{R}$ (это объясняется уменьшением концентрации куперовских пар $n_s \downarrow$ и увеличением концентрации «нормальных» квазичастиц (электронов) $n_n \uparrow$ в массивном сверхпроводнике, составляющем джозефсоновский переход).

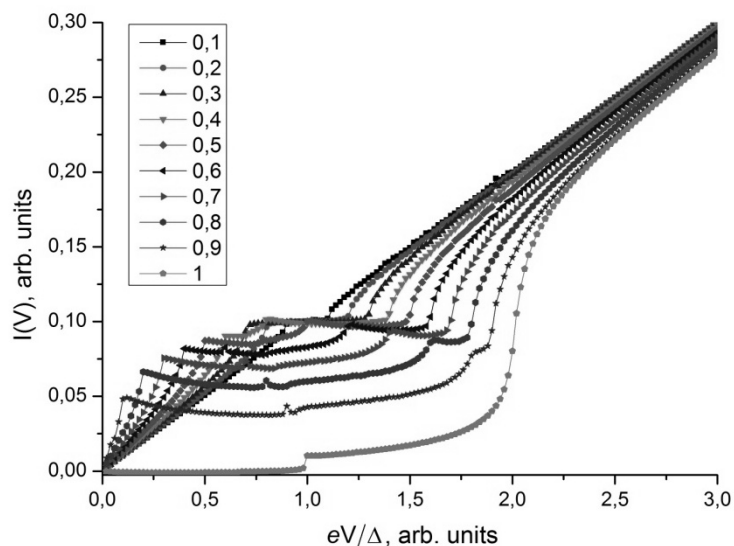


Рисунок 4. Эволюция вольт-амперной характеристики сверхпроводящего туннельного перехода при различных значениях энергетической щели ($\Delta = 0,1 \div 1$ усл. ед.)

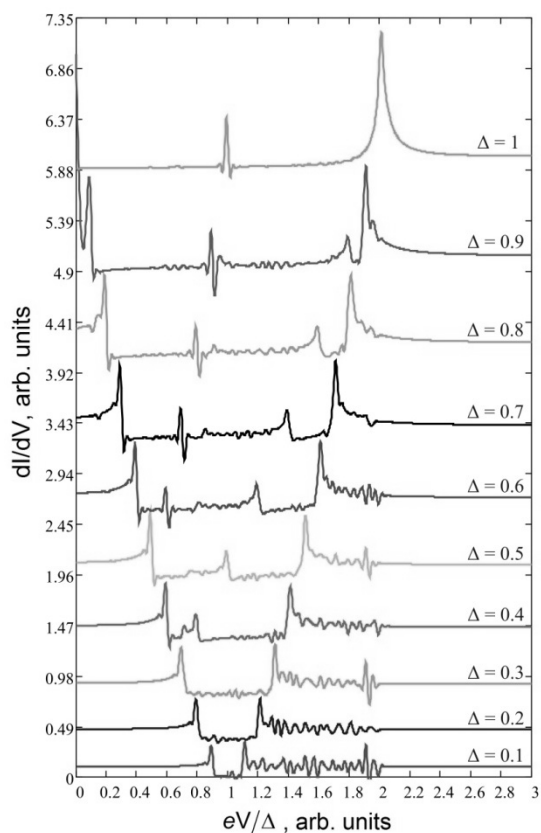


Рисунок 5. dI/dV -Спектры динамической проводимости сверхпроводящего туннельного перехода при различных значениях энергетической щели ($\Delta = 0,1 \div 1$ усл. ед.) (для удобства сравнения спектры сдвинуты по ординате)

В [17] рассмотрена работа смесителя для приемников миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе сверхпроводящего туннельного SIS-перехода из Pb(In). В случае, когда на SIS-переход (Pb(In)-junction) не влияет внешнее напряжение $V_{ext} = 0$, ВАХ перехода удовлетворительно описывается формулой (4) с учетом относительной высоты барьера $h_b = 3$ ($D = 0,1$) (кривая *a*, рис. 6). Отметим, что присутствие внешнего напряжения (воздействующего сигнала частотой 115 ГГц) различного номинала приводит к сглаживанию вертикального составляющего ВАХ (кривые *b, c, d*, рис. 6).

На рисунке 7 приведены экспериментальные кривые SIS-смесителя, состоящего из 14 туннельных переходов на основе Pb сплава, при частоте 115 ГГц [18]. При отсутствии внешнего воздействия (кривая *a*, рис. 7) ВАХ SIS-перехода хорошо описывается в рамках рассматриваемой модели.

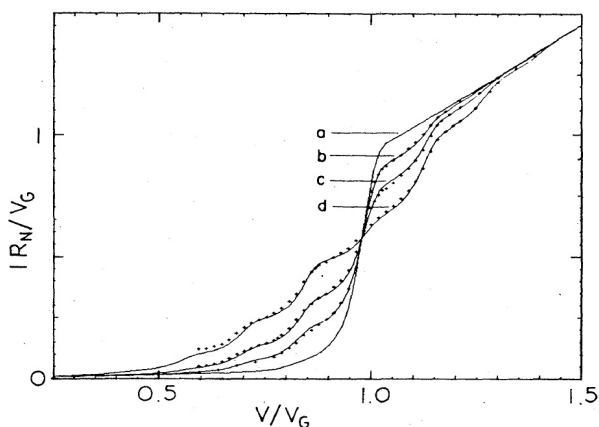


Рисунок 6. Экспериментальные ВАХ туннельного SIS-перехода Pb(In)-junction [17]

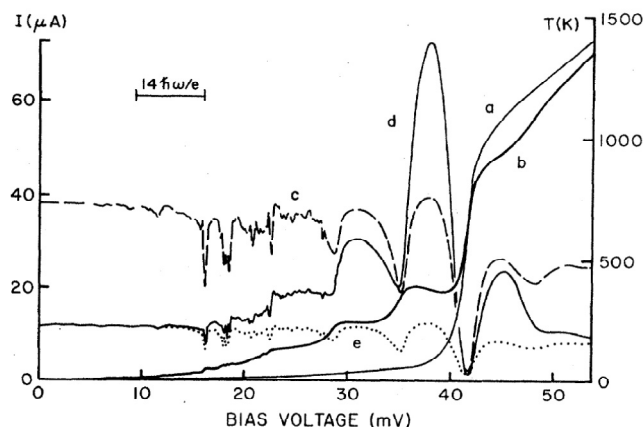


Рисунок 7. Экспериментальные кривые SIS-смесителя при частоте 115 ГГц с использованием 14 туннельных переходов из Pb сплава [18]

На рисунке 5 представлены $dI(V)/dV$ -спектры динамической проводимости сверхпроводящего туннельного перехода. Для удобства сравнения спектры динамической проводимости сдвинуты по оси $dI(V)/dV$ на 0,36 усл. ед. (кривая $\Delta = 0,2$), 0,8 усл. ед. ($\Delta = 0,3$), 1,35 усл. ед. ($\Delta = 0,4$), 1,95 усл. ед. ($\Delta = 0,5$), 2,6 усл. ед. ($\Delta = 0,6$), 3,3 усл. ед. ($\Delta = 0,7$), 4,1 усл. ед. ($\Delta = 0,8$), 4,94 усл. ед. ($\Delta = 0,9$), 5,9 усл. ед. ($\Delta = 1$). Основные пики (по амплитуде) $dI(V)/dV$ -спектров появляются при значении Δ симметрично относительно нормированного напряжения $eV/\Delta = 1$ усл. ед., т.е. для случая $\Delta = 1$ основные пики наблюдаются при eV/Δ , равным 0 и 2; для $\Delta = 0,9$ — при eV/Δ , равным 0,1 и 1,9; для $\Delta = 0,8$ — при eV/Δ , равным 0,2 и 1,8 и т.д. С ослаблением параметра Δ амплитуды $dI(V)/dV$ -спектров уменьшаются и при $\Delta \rightarrow 0$ «сглаживаются». Помимо основных пиков, на $dI(V)/dV$ -спектрах появляются дополнительные пики с малой амплитудой (по сравнению с амплитудой основных пиков). Для случая $\Delta = 1$ дополнительный пик наблюдается при $eV/\Delta = 1$. Для $\Delta = 0,9 \div 0,5$ усл. ед. пики с малой амплитудой наблюдаются при $eV = \Delta$ и $eV = 2\Delta$, например, для случая $\Delta = 0,9$ дополнительные пики появляются при eV , равным 0,9 и 1,8 усл. ед., для $\Delta = 0,8$ — при eV , равным 0,8 и 1,6 усл. ед. и т.д.

Заключение

Таким образом, в данной работе рассчитаны вольт-амперные характеристики и $dI(V)/dV$ -спектры дифференциальной проводимости сверхпроводящих туннельных переходов с прозрачностью $D = 0,1$ усл. ед. (при относительной высоте барьера $h_b = 3$) с применением метода матрицы рассеяния. Показано, что основной вклад в ток вносят туннелирующие сверхпроводящие электроны (куперовские пары), а вероятность наблюдения андреевского отражения мала из-за низкой

прозрачности барьера. Приведены эволюция вольт-амперных характеристик и $dI(V)/dV$ -спектры дифференциальной проводимости джозефсоновского перехода с изменением параметра порядка от 0,1 до 1 усл. ед. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными и могут быть полезными для расчетов элементов сверхчувствительных приемных устройств миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн на джозефсоновских туннельных переходах.

Список литературы

- 1 Karpov A., Blondel J., Dmitriev P., Koshelets V. A Broad Band Low Noise SIS Radiometer // IEEE Trans. on Appl. Supercond. — 1999. — Vol. 9. — No. 2. — P. 4225–4228.
- 2 Suzuki M., Watanabe T., Matsuda A. Interlayer Tunneling Spectroscopy for Slightly Overdoped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ // Phys. Rev. Lett. — 1999. — Vol. 82. — No. 26. — P. 5361–5364.
- 3 Tucker J.R., Feldman M.J. Quantum detection at millimeter wavelengths // Rev. Mod. Phys. — 1985. — Vol. 57. — No. 4. — P. 1055–1113.
- 4 Лухарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. — М.: Наука, 1985. — 320 с.
- 5 Barone A., Paterno G. Physics and Applications of the Josephson Effect. — New York: Wiley & Sons, 1982. — 639 p.
- 6 Сергеев Д.М. Ангармонизм сверхпроводящего тока в джозефсоновских структурах. — Актөбе, 2013. — 175 с.
- 7 Сергеев Д.М., Шункеев К.Ш. Моделирование вольтамперной характеристики джозефсоновского перехода // Вестн. Караганд. ун-та. Сер. Физика. — 2008. — № 1 (49). — С. 33–37.
- 8 Landauer R. Residual Resistivity Dipoles // Z. Phys. B. — 1975. — Vol. 21. — P. 247–254.
- 9 Buttiker M. Scattering theory of thermal and excess noise in open conductors // Phys. Rev. Lett. — 1990. — Vol. 65. — No. 23. — P. 2901–2904.
- 10 Buttiker M. Scattering theory of current and intensity noise correlations in conductors and wave guides // Phys. Rev. B. — 1992. — Vol. 46. — No. 19. — P. 12485–12507.
- 11 Buttiker M. Capacitance, admittance, and rectification properties of small conductors // J. Phys. Condensed Matter. — 1993. — Vol. 5. — P. 9361–9378.
- 12 Лесовик Г.Б., Садовский И.А. Описание квантового электронного транспорта с помощью матрицы рассеяния // УФН. — 2011. — Т. 181. — С. 1041.
- 13 Сергеев Д.М., Кузьмичев С.А., Аймаганбетова З.К., Шункеев К.Ш. Моделирование динамической проводимости баллистических контактов на основе сверхпроводников со слабоосциллирующим параметром порядка в диапазоне энергии 60–100 meV в режиме высокой прозрачности // Известия НАН РК. Серия физ.-мат. — 2015. — Т. 2. — № 300. — С. 116–123.
- 14 Blonder G.E., Tinkham M., Klapwijk T.M. Transition from metallic to tunneling regimes in superconducting microconstrictions: Excess current, charge imbalance, and supercurrent conversion // Phys. Rev. B. — 1982. — Vol. 25. — P. 4515–4532.
- 15 Averin D., Bardas A. ac Josephson Effect in Single Quantum Channel // Phys. Rev. Lett. — 1995. — Vol. 75. — P. 1831–1834.
- 16 Bardeen J., Cooper L.N., Schrieffter J.R. Theory of Superconductivity // Phys. Rev. — 1957. — Vol. 108. — P. 1175–1204.
- 17 Phillips T.G., Dolan G.J. SIS mixers // Physica B+C. — 1982. — Vol. 109–110. — P. 2010–2019.
- 18 Kerr A.R., Pan S.-K., Feldman M.J., Davidson A. Infinite available gain in a 115 GHz SIS mixer // Physica B+C. — 1981. — Vol. 108. — P. 1369–1370.

Д.М.Сергеев, И.Н.Балмұхан

Барьердің салыстырмалы биіктігі $h_b = 3$ тең асқын өткізгіш туннельдік ауысымның шашырау матрицасы негізінде вольт-амперлік сипаттамасын есептеу туралы

Кванттық транспорттық құбылыстар теориясы аясында шашырау матрицасы әдісін қолдану арқылы барьердің салыстырмалы биіктігі $h_b = 3$ тең асқын өткізгіш туннельдік ауысымның вольтамперлік сипаттамасы мен дифференциалды өткізгіштің $dI(V)/dV$ -спектрлері есептелген. Асқын өткізгіш саңылауы (реттелу параметрі) $0,1 \div 1$ ш. б. аралығында өзгергендегі Джозефсон ауысымының транспорттық сипаттамаларының эволюциясы көрсетілген. Қарастырылған жағдайда барьердің мөлдірлігі тұрақты болғандықтан ($D = 0,1$), ауысымға температураның әсер етуі массивті асқын өткізгіштің реттелу параметрін $0,1 \div 1$ ш. б. аралығында өзгерту арқылы модельді зерттелген.

About calculation of the current-voltage characteristics of the superconducting tunnel junction based on a scattering matrix at a relative barrier height $h_b = 3$

Within the framework of the theory of quantum transport phenomena using the method of a scattering matrix were calculated current-voltage characteristics and $dI(V)/dV$ -differential conductivity spectra of superconducting tunnel junctions at a relative barrier height $h_b = 3$. The evolution of the transport characteristics of a Josephson junction with a change in the superconducting gap (the order parameter) from $0,1 \div 1$ arb. units was shown. In this case, the effect of temperature on the transition was studied theoretically by varying of the order parameter value of a massive superconductor in a range of $0,1 \div 1$ arb. units, because the relative transparency of the transition barrier is constant ($D = 0,1$).

References

- 1 Karpov A., Blondel J., Dmitriev P., Koshelets V. *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 1999, 9, 2, p. 4225–4228.
- 2 Suzuki M., Watanabe T., Matsuda A. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 82, 26, p. 5361–5364.
- 3 Tucker J.R., Feldman M.J. *Rev. Mod. Phys.*, 1985, 57, 4, p. 1055–1113.
- 4 Likharev K.K. *Introduction to the dynamics of Josephson junctions*, Moscow: Nauka, 1985, 320 p.
- 5 Barone A., Paterno G. *Physics and Applications of the Josephson Effect*, New York: Wiley & Sons, 1982, 639 p.
- 6 Sergeyev D.M. *Anharmonicity superconducting current in Josephson structures*, Aktobe, 2013, 175 p.
- 7 Sergeyev D.M., Shunkeyev K.Sh. *Vestnik of KarSU. Seriya Fizika*, 2008, 1 (49), p. 33–37.
- 8 Landauer R. *Z. Phys. B*, 1975, 21, p. 247–254.
- 9 Buttiker M. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 65, 23, p. 2901–2904.
- 10 Buttiker M. *Phys. Rev. B*, 1992, 46, 19, p. 12485–12507.
- 11 Buttiker M. *J. Phys. Condensed Matter.*, 1993, 5, p. 9361–9378.
- 12 Lesovik G.B., Sadovskyy I.A. *Successes of physical sciences*, 2011, 181, p. 1041.
- 13 Sergeyev D.M., Kuzmichev S.A., Aimaganbetova Z.K., Shunkeyev K.Sh. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physico-Mathematical Series*, 2015, 2, 300, p. 116–123.
- 14 Blonder G.E., Tinkham M., Klapwijk T.M. *Phys. Rev. B*, 1982, 25, p. 4515–4532.
- 15 Averin D., Bardas A. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 75, p. 1831–1834.
- 16 Bardeen J., Cooper L.N., Schrieffer J.R. *Phys. Rev.*, 1957, 108, p. 1175–1204.
- 17 Phillips T.G., Dolan G.J. *Physica B+C*, 1982, 109–110, p. 2010–2019.
- 18 Kerr A.R., Pan S.-K., Feldman M.J., Davidson A. *Physica B+C*, 1981, 108, p. 1369–1370.

D.U.Smagulov¹, N.A.Belov², A.M.Dostayeva¹

¹*K.I.Satpayev Kazakh National Technical University, Алматы;*

²*National University of Science and Technology «MIS and A», Moscow, Russia
(E-mail: nikolay-belov@yandex.ru)*

Roasting effect on the electrical resistivity of the Al-0,5%Zr alloys

The effect of regimes of deformation and heat treatment on electrical resistivity and vickers hardness of 2 aluminum alloys containing 0.2% Zr and 0.4% Zr (mass%) was studied. Flat ingots (10x40x200 mm and 40x120x200 mm) were produced by casting into a graphite moulds. Ingots were hot and cold rolled to obtain sheets (thickness 1.3 mm and 5 mm for cold rolled and hot rolled accordingly). Ingots and sheets were annealed according to multistage modes in the temperature range 200–650 °C with a step of 50 °C and 3 h holding at each stage. Polished samples cut from the central part of the ingots (as-cast and annealed) were studied. The structure was examined in optical (om, axiovert 200 mmat) and electron scanning electron (tescan vega 3) microscopes. Thin foils for transmission electron microscopy (tem) were prepared by electrolytic thinning in a perchloric acid–alcohol solution and studied at 160 kv.

Key words: aluminum alloys, system Al–Zr, phase Al₃Zr, electrical resistivity, deformation and heat treatment, hardening and softening.

Introduction

In the recent years the interest for the aluminum alloys, strong enough, maintaining high electrical conductivity even after the heating up to 250–300 °C grows. Traditional wire line made of technical aluminum of the A5E mark does not satisfy the requirements given, because it loses the strength even after the short-term heating in such temperature range [1, 2].

The solution of the problem is quiet successful approach on the producing of wire line made of low-alloy aluminum with addition of the zirconium [3–6].

The primary pattern of the aluminum wire line designed to produce the lines (core conductors) according to the rules is rod, obtained by the continuous casting and rolling technique on the properzzi and southwire types of equipment [7]. In the wire line made of Al–Zr alloy all required specifications mainly the electrical resistivity and strength (after heating up to 300°C) are determined by the rod metallurgical structure.

Aluminum wire thermostability depends on the zirconium in the alloy as well as the melting, casting and heat treatment processing methods. Positive effect of the zirconium on thermostability is condition by the nanoparticles of the I12 (Al₃Zr) phase, formed in the rod when roasting [8–10]. This is exactly what identified the objectives set out in this work, and is the most important:

- a) to obtain aluminum alloy hot-rolled sheets, with 0,5% Zr, in case of realization of the continuous casting and rolling on the industrial installations;
- b) to study the roasting temperature effect (up to 650 °C and including) on the specific electrical resistivity and strength of these sheets;
- в) to rationalize a profitable ratio between the roasting temperature and zirconium concentration.

Experimental technique

In the capacity of the main study objects sheets of aluminum alloy with 0,5% Zr were taken. Experimental alloys were prepared of the primary aluminum of the a7e (GOST 11069–2001) mark in the graphite-clay crucible of electrical resistance furnace. Zirconium was introduced into the alloy under temperature of 850–900 °C (i.e. higher than a liquidus point) in the form of Al–15% Zr (GOST 53777–2010) ligature [11]. 40x120x200 mm ingots were obtained by casting into the graphite casting-form. Sheets made of such ingots (figure 1) were obtained as follows: to heat ingots casted to 450 °C, then roll the sheets with 87,5% degree of squeezing and up to 5 mm thickness.

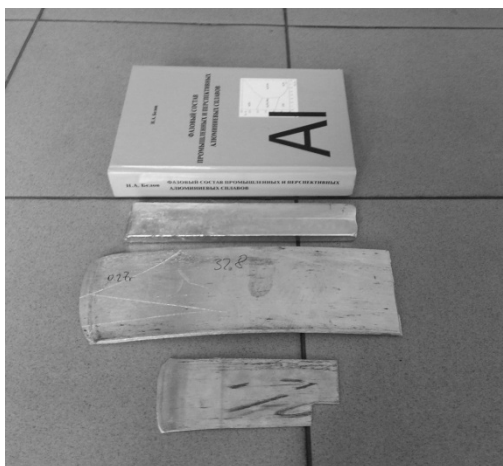


Figure 1. Appearance of the experimental ingots and sheets made of them

Chemical alloys composition study was performed on the ARL 4460 spectrometer, results are shown in the table 1.

Table 1

Chemical composition of experimental alloys

Alloy		Concentration, % wt.			
№	Reference	Si	Fe	Zr	Al
0	00Zr	0,0073	0,140	-	base
1	02Zr	0,072	0,139	0,180	base
2	03Zr	0,074	0,131	0,283	base
3	04Zr	0,080	0,140	0,380	base
4	05Zr	0,075	0,133	0,476	base

A sheet roasting was performed under the temperature of 300–650 °C (table 2), with accuracy ranging of ±5 °C, stepwise in a muffle electric furnace («snol»).

Table 2

Ingots roasting conditions of the Al–Zr–Si system alloys

reference	Roasting method
t 300	t 300 °C, hour
t 350	t 300 +350 °C, 3 hours
t 400	t 350 +400 °C, 3 hours
t 450	t 400 +450 °C, 3 hours
t 500	t 450 +500 °C, 3 hours
t 550	t 500 +550 °C, 3 hours
t 600	t 550 +600 °C, 3 hours
t 650	t 600 +650 °C, 3 hours

Specific electrical resistivity (γ) and Vickers hardness (HV) were measured for each condition. The γ — value was determined by the eddy-current method on the VE-26NP device, then specific electric resistance (ρ) was calculated. Vickers hardness was determined on the Wilson Wolpert 930 N hardness tester with the following parameters: pressure-50 H, hold time — 15 c.

Ingots and sheets metallurgical structure was studied on the light (SM) and electronic scanning microscope (SEM) respectively: Axio Observer MAT and TESCAN VEGA 3. For polished section preparations the electrolytic polishing and mechanical polishing were used under 12V voltage, electrolytic conductor, which has 6 parts of C₂H₅OH, 1 part of HClO₄ and 1 part of glycerin.

Fine-structural investigation (first of all to indicate the Al_3Zr precipitation) was carried out on the JEM2100 electronic microscope (TEM) with high resolution and 200kV acceleration voltage. As the objects of study foils obtained by the thinning-down of sheets were used.

For digital analysis of the phase structure (components concentration calculation and the mass fraction of phase — in the aluminum solid solution (Al) the Thermo-Calc (TTAL5 database) software was used.

Experiment results and their analysis

Metallographic ingots examination showed the difference absence in the metallurgical structure between the experimental alloys, because the zirconium upon crystallization was entirely introduced into the aluminum solid solution composition (hereinafter (Al), Fe and Si concentration are approximately the same (see table 1).

Metallurgical structure observed is similar with the electrotechnical aluminium metallurgical structure of the A7E mark: phases inclusions in the form of skeletal fragments or the boundaries of the dendritic cells (Al) [12]. During the rolling process equiaxial grain structure was changed to the fibrous, phases inclusions with the presence of ferrum were extended too.

The roasting has no appreciable effect on the structure detected in the light microscope, therefore structural and phase conversion upon roasting were evaluated by the results of special electrical resistivity changes and strength, by the reports results as well. As per condition diagram the Al–Zr experimental alloys (disregarding Fe and Si impurities) at all temperatures fall into the two-phase field (Al)+ Al_3Zr (figure 2). Exception is the 02Zr and 03Zr alloys, which at the temperature 650 °C should be one-phase. Calculations were made upon stable and metastable equilibrium, in accordance with this D0_{23} and L1_2 phases [13]. Zr solubility in the solid solution of (Al) increases under temperature over 400–450 °C. Solubility is significantly higher by the metastable version as well.

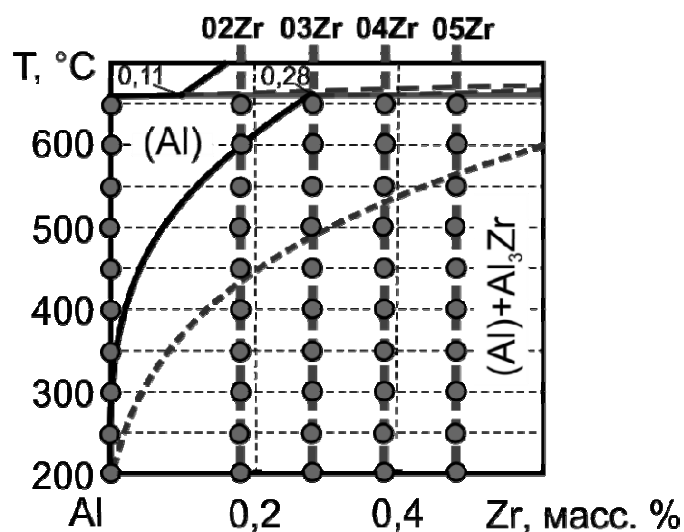


Figure 2. Condition diagram Al–Zr fragment with marked conditions of experimental alloys under different roasting conditions (table 2): dotted graph — the solvus of the L1_2 metastable phase

Special electrical resistivity dependence of the experimental alloys on the temperature of the last step of roasting is quite difficult (figure 3). When comparing with unalloyed aluminum, of which resistivity value is comparable to the experimental precision, in the alloys with addition of zirconium a great changes are revealed. Especially they are great upon maximum concentration of zirconium in the alloy (C_{Zr}), 05Zr alloys has the difference in special electrical resistivity approximately of $5,4 \text{ Ohm}\cdot\text{m}\cdot 10^{-9}$ (or $\sim 15\%$).

As can be seen from the dependences, shown in the figure 3a, when multistep roasting is applied a minimum value of electrical resistivity is observed under 450 °C, it is explained by the maximum reduce of the zirconium concentration ($C_{\text{Zr-(Al)}}$) in the aluminum solid solution. This contradicts with the data, calculated by the metastable version on which under such a temperature the $C_{\text{Zr-(Al)}}$ value is very significant. There are two explanations of this situation. First, upon low temperature (below 400 °C) zirconium diffusion in the (Al) is quite low, therefore total decomposition process requires more time [14, 15]. By data [10] 500-

hours of roasting fewer than 300 °C is not enough. Second, upon 450 °C, there is possibility to rely on the equilibrium solubility of Zr in the (Al), which is quite lower than the metastable version (for D0₂₃ phase).

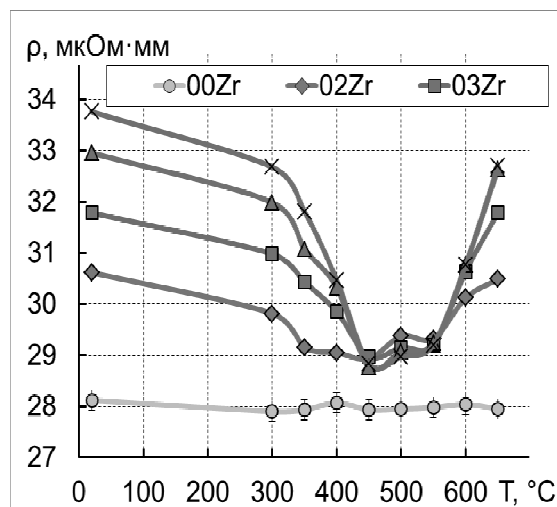


Figure 3. Temperature effect of the last step of roasting on the specific electrical resistivity of the experimental alloys sheet

Upon temperature increase there is effect of C_{Zr} is observed. In the 02Zr and 03Zr alloys there is softening upon temperature of 350 °C and 400 °C is observed respectively. In more hydrametals of 04Zr and 05Zr the hardness is high enough even at 450 °C. At 500 °C and above all alloys are softening.

Closing

Temperature effect of roasting up to 650 °C on hardness and specific electrical resistivity is studied. (SER) of the aluminum alloys hot-rolled sheets with 0,5 % wt of Zr in case of realization on the industrial installations of continuous casting and rolling.

Using the calculations and experimental techniques we defined that SER (specific electrical resistivity of concentrate) mostly depends on the concentration of zirconium in the aluminum solid solution, it is minimum upon 3-hours of roasting at 450 °C. From the other hand, is conditioned with the quantity of nanoparticles of the L1₂ (Al₃Zr) phase, determining the thermo stability, maintaining of the mechanical hardening.

It is shown that a good alignment of SER values, strength and thermo stability is possible to achieve, if the temperature of thermal heating will be 400–450 °C, and concentration of zirconium is not below 0,3%.

References

- 1 Aluminum. Properties and physical metallurgy: Reference edition. Antony U.U., Elliot F.R., Boll M.D. / under ed. J.E.Hatch: Transl. from English. — M.: Metallurgy, 1989, 324 p.
- 2 Belov N.A., Alabin A.N., Prokhorov A.Y. The effect of zirconium additives on the strength and electrical resistance of cold rolled aluminum sheets // Nonferrous-metals industry. — 2009. — № 4. — P. 42–47.
- 3 US Patent 4402763 (publ. 09.06.1983)
- 4 Uliasz P., Knych T., Mamala A., Smyrak B. Aluminium Alloys, edit. by J. Hirsch, B. Skrotzki and G. Gottstein (WILEY-VCH, Weinheim, 2008). — P. 248–255.
- 5 Zhou W.W., Cai B., Li W.J., Liu Z.X., Yang S. Heat-resistant Al–0.2Sc–0.04Zr electrical conductor // Materials Science and Engineering. A 552. — 2012. — P. 353–358.
- 6 Belov N.A. Principles of Optimising the Structure of Creep-Resisting Casting Aluminium Alloys Using Transition Metals // Journal of Advanced Materials. — 1994, 1 (4). — P. 321–329.
- 7 Vorontsova L.A. Aluminum and aluminum alloys in electrical products. — M.: Energy, 1971. — 224 p.
- 8 Booth-Morrison C., Dunand D.C., Seidman D.N. Coarsening resistance at 400 °C of precipitation-strengthened Al–Zr–Sc–Er alloys // Acta Mater. 59. — 2011. — P. 7029–7042.
- 9 Knipling K.E., Karnesky R.A., Lee C.P., Dunand D.C., Seidman D.N. Precipitation evolution in Al–0.1Sc, Al–0.1Zr and Al–0.1Sc–0.1Zr (at.%) alloys during isochronal aging // Acta Mater. 58. — 2010. — P. 5184–5195.
- 10 Belov N.A., Alabin A.N., Prokhorov A.Y., Skvortsov N.V. Effect of intermediate roasting on the electrical resistivity of low-alloy aluminum alloys wire lines of the Al–Zr–Fe–Si system // Metallurgy and heat treatment of metals. — 2012. — № 4. — P. 14–19.

- 11 *Mondolfo L.F.* The structure and properties of aluminum alloys: Translated from English. — M.: Metallurgy, 1979. — 640 c.
- 12 *Belov N.A., Aksenov A.A., Eskin D.G.* Iron in Aluminum Alloys: impurity and alloying element. — Fransi and Tailor, 2002. — 360 p.
- 13 *Sigli C.* Zirconium Solubility in Aluminum Alloys (Proc. — ICAA9 Brisbane, (2004). — P. 1353–1358.
- 14 *Lefebvre W., Danoix F., Hallem H., Forbord B., Bostel A., Marthinsen K.* Precipitation kinetic of Al₃(Sc,Zr) dispersoids in aluminium // J. Alloys Compd. 470. — 2009. — P. 107–110.
- 15 *Knipling K.E., Dunand D.C., Seidman D.N.* Precipitation evolution in Al–Zr and Al–Zr–Ti alloys during isothermal aging at 375–425 °C // Acta Mater. 56. — 2008. — P. 114–127.

Д.У.Смагулов, Н.А.Белов, А.М.Достаева

Al-0,5%Zr қорытпаларының электр кедергісіне күйдірудің әсері

Соңғы жылдары тіпті 250–300 °C дейін қыздырудан кейін де сақталатын жоғары электрөткізгіштік пен жеткілікті беріктіктен тұратын алюминий қорытпаларына деген қызығушылық артуда. А2Е маркалы техникалық алюминийден жасалған дәстүрлі сымдар бұл талаптарды қанағаттандырмайды, себебі олар осындай температуралар кезінде қысқа мерзімді қыздырудан соң да беріксізденеді. Мақалада құйма және беттер түрінде орындалған алюминий қорытпаларының меншікті электр кедергісіне күйдірудің әсері зерттелген. Салқын илемделген беттерде ыдырау баяуырақ жүретіні анықталған. 450 °C кезінде күйдірілген беттерде электркедергісі мен қаттылықтың жақсы үйлесімді мәніне қол жеткізуге болатыны көрсетілген.

Д.У.Смагулов, Н.А.Белов, А.М.Достаева

Влияние обжига на удельное электрическое сопротивление Al-0,5%Zr сплавов

Изучено влияние режимов деформационно-термической обработки на удельное электросопротивление (УЭС) и твердость двух алюминиевых сплавов, содержащих 0,2 и 0,4% Zr и выполненных в виде слитков и листов (холоднокатанных и горячекатанных). Установлено, что медленнее всего распад последнего происходит в слитках, а наиболее быстро — в холоднокатанных листах. С использованием функции желательности показано, что наилучшего сочетания значений УЭС, твердости и стойкости к разупрочнению можно добиться в холоднокатанных листах сплава с 0,4% Zr, отожженного при 450 °C. Такой комплекс свойств обусловлен, главным образом, формированием достаточного количества наночастиц фазы L12 (Al₃Zr), которые определяют сохранение деформационного упрочнения.

V.Ch.Laurinas¹, A.Sh.Syzdykova², E.N.Eremin³, S.A.Guchenko¹, V.M.Yurov¹

¹*Ye.A.Buketov Karaganda State University;*

²*Polytechnic College Corporation «Kazakhmys», Balkhash;*

³*Omsk State Technical University*

(E-mail: weld_techn@mail.ru)

High-temperature strength and corrosion resistance of alloy steel coatings

The investigated coatings were deposited by ion-plasma method while spraying cathode 12X18H10T steel and composite cathodes. It is shown that the larger the surface tension of the coating, the greater the heat resistance. Since the surface tension of the metal is proportional to its melting temperature, it follows that the high-temperature strength primarily depends on the melting point of the metal. The higher melting temperature metal, the higher the recrystallization temperature. As shown experimentally, that the greater the surface tension of the coating, the greater the corrosion resistance.

Key words: coating, heat resistance, corrosion resistance, surface tension, melting point, recrystallization.

Introduction

Under high-temperature strength refers to the ability of the material to resist mechanical failure at high temperatures. Already in the 80s of the last century it became clear that you must not go towards the creation of special heat-resistant alloys and application technology to create a variety of heat-resistant coatings to parts of machines and mechanisms operating in extreme conditions. In subsequent years, the interest in heat-resistant materials and coatings continued to grow with the development of rocket and space technology, energy, etc.

If the product is working in an oxidizing atmosphere at a temperature (500..550) °C without large loads, it is sufficient that they were only heat-resistant (for example, parts of heating furnaces).

To improve the heat resistance of the steel elements are introduced, which form oxides with oxygen dense lattice structure (chromium, silicon, aluminum). High heat resistance have silhromy, nickel-based alloys — nichrome, steel 08X17T, 36X18H25C2, 15X6CЮ.

Heat resistance — the ability of a metal to resist plastic deformation and fracture at high temperatures. Heat-resistant materials are used for the manufacture of parts operating at high temperatures when there is a phenomenon of creep.

In both cases there is a failure of metals, alloys and coatings. The destruction of the metals in supply of thermal energy is accompanied by accumulation of thermal stress, leading to an increase in the density of dislocations, various defects [1–3].

A special place in the complex of measures to ensure the smooth operation of the equipment is given the reliable protection against corrosion and wear.

Corrosion protection is for many years one of the topical issues that are of great importance for the industry and the national economy [4–8].

The need for measures to protect against corrosion is dictated by the fact that the losses from corrosion bring very big damage. According to reports, about 10% of the annual production of the metal used to cover irrecoverable losses due to corrosion and subsequent spraying. The main damage caused by the corrosion of the metal is associated not only with the loss of large amounts of metal but with the damage or failure of themselves metal structures and mechanisms, as a result of corrosion of various parts and components necessary to lose strength, ductility, impermeability, thermal and electrical conductivity, reflectivity ability and other necessary qualities.

To reduce the cost of metal, increasing the reliability and durability of machine parts and equipment, there are only two ways:

- the use of special steels and alloys;
- coating of articles during manufacture or repair.

Since the production of special steels and alloys due to the consumption of scarce and costly special materials and components, in all industrialized countries is not increasing production of special steels and alloys, using the most advanced technology for coating and hardening of parts.

Heat-resistant coating

Currently applying refractory coatings made substantially vacuum arc or magnetron sputtering [9–21]. Thus, various formulations targets include metals such as chromium, titanium, and zirconium in combination with non-ferrous metals. [18] investigated the spray coating of chromium and aluminum in a nitrogen atmosphere. Fig. 1 and 2 show electron microscopic images and XPS and CrN coatings CrAlN.

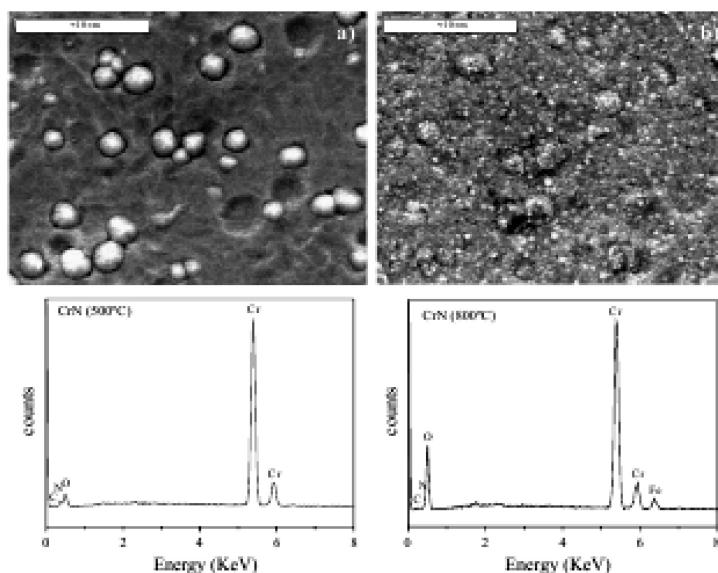


Figure 1. The electron microscopic image and XPS CrN coating at 550 °C (a) and at 800 °C (b) [18]

Aluminum content of 15 at.%. This hydride phase underwent fragmentation (fig. 1 and fig. 2), which affects the mechanical and tribological properties of the coating. For the coating of CrN microhardness is 35.8 GPa and CrAlN coating — 34,8 GPa, i.e. hardness change slightly. The coefficient of friction decreases from 0.56 to 0.42 to the coating CrN coating CrAlN. However, CrAlN coatings have a high thermal stability (heat resistance) than CrN coating.

Industrial tests of coatings CrAlN, described in [18], showed improved performance tool steel AISI M2, in comparison with the coating CrN. This coating was even better than traditional titanium nitride coatings.

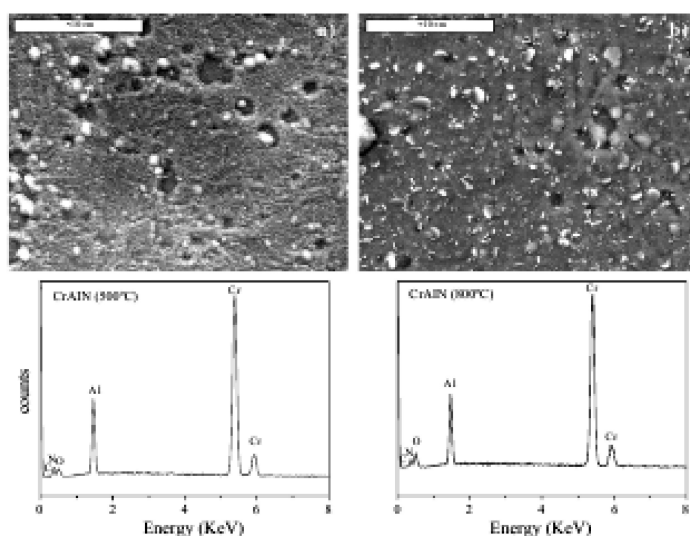


Figure 2. The electron microscope image and XPS CrAlN coating at 550 °C (a) and at 800 °C (b) [18]

Anti-corrosion coatings

Consider some of the anti-corrosion coatings obtained by magnetron sputtering [22–29]. [22] studied the erosion and corrosion of austenitic steel AISI 304L with the content of nitrogen in the coating to 0.55 wt.%. Corrosion of steel was estimated by weight loss by oxidation, and erosion of — Analysis damage steel reactor containing the suspension of 3,5% NaCl and quartz particles. The results of this work are shown in fig. 3.

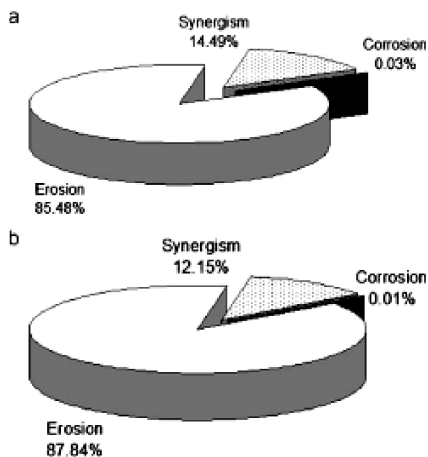


Figure 3. Synergism between corrosion and erosion of the steel AISI 304L without nitriding (a) and after nitriding (b) [22]

Suitable authors noteworthy because, in general, the synergy — is a property of the system, consisting in the fact that the joint cooperation ce elements (subsystems) provided an increase in their total effect to a value greater than the sum of the effects of these elements (subsystems) acting independently from each other. Hence, it enhances communication elements (subsystems), provided their coordinated functioning in the system.

Currently, treatment synergism devoted a huge amount of work: developed its own methodology, formulated the basic laws. However, this theory is based on general systems theory, which is so common, that does not give a quantitative description of the observed effects. Therefore, we will not refer to the synergies that the interpretation of experimental data.

In [24] showed that the corrosion resistance of aluminum alloy is anisotropic. This imposes certain constraints on its surface treatment, in particular on its polishing, which creates a certain dislocation density in the surface layer of the alloy.

Interesting is the work of [28], which investigated the corrosion resistance of the coatings FeCrVN on tool steel. It set a goal — to link the mechanical properties of the coatings at the nanoscale and their distribution over the area of the sample with corrosion-resistant coatings. Using this approach, one can predict the emergence of corrosion spots at an early stage and eventually predict early «corrosive breakdown» alloy.

In [29] studied magnetron coating niobium — niobium oxide. The coating showed very high resistance to corrosion, even in the enriched (heavy) water, obtained by proton irradiation. The mechanism of occurrence of corrosion resistance shown in fig. 4.

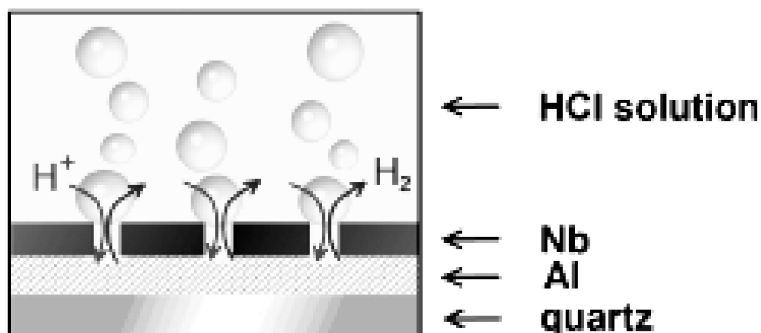


Figure 4. Schematic diagram of the formation of the diffusion barrier [29]

Although niobium is chemically inert, but it has a coating of a columnar structure characteristic of single-phase films. Therefore, acid or enriched with honey water diffuses these «pillars». With simultaneous sputtering of niobium and niobium oxide, the latter being an amorphous structure, fills the space between the pillars and dramatically increases the value of the diffusion barrier.

Heat resistance steel alloy coatings

We investigated coatings were deposited by ion-plasma method while spraying cathode 12X18H10T steel and composite cathodes. Method for determination of heat resistance is based on GOST 6130-71 «Metals. Methods for determination of heat resistance» and coatings the determination of heat resistance of thermal spray coatings. Heat resistance is determined by exposing the coated specimens (and uncoated control) in an air oven for a predetermined time at a constant temperature, followed by weighing, examination, metallographic examination. Accelerated cyclic tests carried out by switching off the oven (10–50) hours. The results of the experiment are shown in table 1 and 2.

Table 1

The weight loss of the coating produced in argon, after heat treatment at 600 °C for 100 hours

The coating	Mass of oxides of coating, mg
A sample of uncoated, steel 45	56,8
12X18H10T+Zr	24,4
12X18H10T+Zn-Cu-Al	14,4
12X18H10T+Fe-Al	5,6
12X18H10T+Zn-Al	14,2
12X18H10T+Al	4,8
12X18H10T+Cu	2,7

Table 2

The weight loss of the coating produced in a nitrogen atmosphere after heat treatment at 600 °C for 100 hours

The coating	Mass of oxides of coating, mg
A sample of uncoated, steel 45	56,8
12X18H10T+Zr	35,1
12X18H10T+Zn-Cu-Al	20,7
12X18H10T+Fe-Al	8,1
12X18H10T+Zn-Al	20,4
12X18H10T+Al	6,9
12X18H10T+Cu	3,9

Comparison of the results in Tables 1 and 2 with the results of [30] follows the conclusion: the greater the surface tension of the coating, the greater the heat resistance. If the heat resistance mark — ζ , say something mathematically can be expressed as a functional relationship:

$$\zeta = f(\sigma) = C \cdot \sigma, \quad (1)$$

where C — a constant.

Since the surface tension of the metal is proportional to its melting temperature, it follows that the high-temperature strength primarily depends on the melting point of the metal.

Corrosion resistance of alloy steel coating

In cases where the corrosion process proceeds as general corrosion, to evaluate the corrosion rate can change the amount of metal used in a process changing the amount of the reaction agent (oxidant), or one of the products of corrosion over time. Since the corrosion process is heterogeneous, the appropriate quantitative characteristics should be referred to the unit surface.

Tables 3 and 4 shows the corrosion rate at 600 °C investigated coatings is determined by the formula:

$$v_k = \Delta m / S \cdot t, \quad (2)$$

where Δm — decrease (increase) in weight; S — area of the sample; t — time.

Comparison of the results of Tables 3 and 4, with the results of [30] follows the conclusion: the greater the surface tension of the coating, the greater the corrosion resistance. If corrosion resistance mark — χ , say something mathematically can be expressed as a functional relationship:

$$\chi = f(\sigma) = C_1 \cdot \sigma, \tag{3}$$

where C_1 – a constant.

Formulas 1 and 3 are mathematically equivalent. The only difference in the constants C and C_1 .

Table 3

Corrosion Rates at 600 °C the coating obtained in argon

The coating	Corrosion Rates, g/m ² ·h
A sample of uncoated, steel 45	2,84
12X18H10T+Zr	1,22
12X18H10T+Zn-Cu-Al	0,72
12X18H10T+Fe-Al	0,28
12X18H10T+Zn-Al	0,71
12X18H10T+Al	0,24
12X18H10T+Cu	0,13

Table 4

The corrosion rate at 600 °C the coating produced in nitrogen

The coating	Corrosion Rates, g/m ² ·h
A sample of uncoated, steel 45	2,84
12X18H10T+Zr	1,76
12X18H10T+Zn-Cu-Al	1,03
12X18H10T+Fe-Al	0,40
12X18H10T+Zn-Al	1,02
12X18H10T+Al	0,34
12X18H10T+Cu	0,19

We compare the results obtained with the corrosion rate of certain corrosion-resistant stainless steel (table 5).

Table 5

The rate of corrosion of the most corrosion-resistant steels

Steel grade	Corrosion Rates, g/m ² ·h
X23H28M3Д3Т	0,21
X23H27M3Т	0,26
X18H12M3Т	0,80

Comparison of the results of Tables 3 and 4 with Table 5 follows the conclusion: the greater the corrosion resistance of the coatings tested is not inferior to the most corrosion-resistant steel.

Moreover, any of the surfaces of tables 3 and 4 are significantly superior corrosion resistance of steel 45, which is widely used as a structural steel in the manufacture of: pinion shafts, crankshafts and camshafts, gears, spindles, tires, cylinders, cams and other normalized, improves, and subjected to heat treatment of superficial parts, which are required increased strength.

Estimation of melting and crystallization of alloyed steel coatings

Melting and solidification of the steel depends on its composition. Usually when calculating the T_L and T_S to make assumptions about the additive effect of dopants on these values.

Using the results of experimental determination of the surface tension of the multi-element surfaces, and results of the calculation of this value on the basis of elemental analysis can show that the average value of the surface tension is the value of the additive. In this case, the melting point of the coating can be estimated by the formula:

$$T_L = 1,4 \cdot 10^3 \cdot \sigma (K). \tag{4}$$

The corresponding estimates are shown in Tables 6 and 7.

Table 6

Melting point multielement coatings obtained in argon

The coating	T_L, K	The coating	T_L, K
12X18H10T+Zr	1358	12X18H10T+Zn-Al	1537
12X18H10T+ Zn-Cu-Al	1530	12X18H10T+Al	1602
12X18H10T+Fe-Al	1809	12X18H10T+Cu	2023

Table 7

Melting point multielement coatings obtained in a nitrogen atmosphere

The coating	T_L, K	The coating	T_L, K
12X18H10T+Zr	1259	12X18H10T+Zn-Al	1098
12X18H10T+ Zn-Cu-Al	1042	12X18H10T+Al	1121
12X18H10T+Fe-Al	1448	12X18H10T+Cu	1445

As shown in tables 6 and 7, the melting point of the coatings obtained in argon lower than coatings obtained in a nitrogen atmosphere. Especially the big difference is observed for the coatings doped zirconium.

Melting steels depends on their chemical composition, but is in the range (1450–1520) K. As shown in tables 6 and 7 coating 12X18H10T+Al, 12X18H10T+Fe-Al and 12X18H10T+Cu, prepared under argon, at a temperature of the melting far superior to all steel.

Conclusion

In this paper was not intended to produce heat-resistant and corrosion-resistant coatings. Using multi-element coverage, we wanted to show the connection between the properties of the coating and the surface energy of the coating, as well as provide a methodology for evaluating the heat resistance and corrosion resistance of coated materials.

References

- 1 *Davis J.R.* Heat Resistant Materials. — ASM International, 1997. — 591 p.
- 2 *Gao W., Li Zh. (Ed.)* Developments in High Temperature Corrosion and Protection of Materials. — Woodhead Publishing Ltd, 2008. — 658 p.
- 3 *Madhusudana Chakravarti V.* Thermal Contact Conductance. — Springer International Publishing Switzerland, 2014. — XVIII. — 260 p.
- 4 *Strutt I.E., Nicholls and Barbier B.* The prediction of corrosion by statistical analysis of corrosion profiles // Corrosion science. — 1985. — Vol 25. — No. 5. — P. 305–316.
- 5 *Provan J.W., Rodriguez E.S.* Development of a Markov description of pitting corrosion. — Corrosion (USA), 1989. — Vol. 45. — No. 3. — P. 178–192.
- 6 *Baroux B.* The kinetics of pit generation on stainless steel // Corrosion science. — 1988. — Vol. 28. — No. 10. — P. 969–986.
- 7 *Kondo J.* Prediction of fatigue crack initiation life based on pit growth // Corrosion science. — 1989. — Vol. 45. — No. 1. — P. 7–11.
- 8 *Gao W., Li Zh. (Eds.)* Developments in High Temperature Corrosion and Protection of Materials. — Woodhead Publishing Ltd, 2008. — 658 p.
- 9 *Rea M.D., Gouttebaron R., Dauchot J.-P. et al.* Study of ZrN layers deposited by reactive magnetron sputtering // Surface and Coatings Technology. — 2003. — Vol. 174, 175. — P. 240–245.
- 10 *Zeman P., Cerstvy R., Mayrhofer P.H. et al.* Structure and properties of hard and superhard Zr–Cu–N nanocomposite coatings // Materials Science and Engineering, 2000. — A 289. — P. 189–197.
- 11 *Sheng S.H., Zhang R.F., Veprek S.* Phase stabilities and thermal decomposition in the $Zr_{1-x}Al_xN$ system studied by ab initio calculation and thermodynamic modeling // Acta Materialia. — 2008. — Vol. 56. — P. 968–976.
- 12 *Musila J., Karvankova P., Kasl J.* Hard and superhard Zr–Ni–N nanocomposite films // Surface and Coatings Technology. — 2001. — Vol. 139. — P. 101–109.
- 13 *Suna J., Musil J., Ondok V., Han J.G.* Enhanced hardness in sputtered Zr–Ni–N films // Surface and Coatings Technology. — 2006. — Vol. 200. — P. 6293–6297.
- 14 *Musil J., Danie R.* Structure and mechanical properties of magnetron sputtered Zr–Ti–Cu–N films // Surface and Coatings Technology. — 2003. — Vol. 166. — P. 243–253.

- 15 Musil J., Polakova H. Hard nanocomposite Zr-Y-N coatings, correlation between hardness and structure // Surface and Coatings Technology, 2000. — Vol. 127. — P. 99–106.
- 16 Daniel R., Musil J., Zeman P., Mitterer C. Thermal stability of magnetron sputtered Zr-Si-N films // Surface and Coatings Technology. — 2006. — Vol. 201. — P. 3368–3376.
- 17 Xueliang Q., Yanhong H., Yiping W., Jianguo Ch. Study on functionally gradient coatings of Ti-Al-N // Surface and Coatings Technology. — 2000. — Vol. 131. — P. 462–464.
- 18 Scheerer H., Hoche H., Broszeit E. et al. Effects of the chromium to aluminum content on the tribology in dry machining using (Cr, Al)N coated tools // Surface and Coatings Technology. — 2005. — Vol. 200. — P. 203–207.
- 19 Brizuela M., Garcia-Luisa A., Braceras I. et al. Magnetron sputtering of Cr(Al)N coatings: Mechanical and tribological study // Surface and Coatings Technology. — 2005. — Vol. 200. — P. 192–197.
- 20 Monclus M.A., Baker M.A., Tsotsos C. et al. Investigation of the nanostructure and post-coat thermal treatment of wear-resistant PVD (Cr-Ti-Cu-B)N coatings // Surface and Coatings Technology. — 2005. — Vol. 200. — P. 310–314.
- 21 Wang L., Niew X., Housden J. et al. Material transfer phenomena and failure mechanisms of a nanostructured Cr-Al-N coating in laboratory wear tests and an industrial punch tool application // Surface and Coatings Technology. — 2008. — Vol. 203. — P. 816–821.
- 22 Lopez D., Alonso Falleiros N., Tschiptschin A.P. Effect of nitrogen on the corrosion-erosion synergism in an austenitic stainless steel // Tribology International. — 2011. — Vol. 44. — P. 610–616.
- 23 Liu R., Li X., Hu X., Dong H. Surface modification of a medical grade Co-Cr-Mo alloy by low-temperature plasma surface alloying with nitrogen and carbon // Surface and Coatings Technology. — 2013. — Vol. 232. — P. 906–911.
- 24 Lv Jinlong, Luo Hongyun. Effect of surface burnishing on texture and corrosion behavior of 2024 aluminum alloy // Surface and Coatings Technology. — 2013. — Vol. 235. — P. 513–520.
- 25 Lee Y.J., Lee T.H., Kim D.Y. et al. Microstructural and corrosion characteristics of tantalum coatings prepared by molten salt electrodeposition // Surface and Coatings Technology. — 2013. — Vol. 235. — P. 819–826.
- 26 Castillejo F.E., Marulanda D.M., Olaya J.J., Alfonso J.E. Wear and corrosion resistance of niobium-chromium carbide coatings on AISI D2 produced through TRD // Surface and Coatings Technology. — 2014. — Vol. 254. — P. 104–111.
- 27 Klemm J., Klemm S.O., Duarte M.J. et al. Multi-element-resolved electrochemical corrosion analysis. Part I. Dissolution behavior and passivity of amorphous Fe₅₀Cr₁₅Mo₁₄C₁₅B₆ // Corrosion Science. — 2014. — Vol. 89. — P. 59–68.
- 28 Alvarez-Asencio R., Sababi M., Pan J. et al. Role of microstructure on corrosion initiation of an experimental tool alloy: A Quantitative Nanomechanical Property Mapping study // Corrosion Science. — 2014. — Vol. 89. — P. 236–241.
- 29 Skliarova H., Renzelli M., Azzolini O. et al. Niobium-niobium oxide multilayered coatings for corrosion protection of proton-irradiated liquid water targets for [¹⁸F] production // Thin Solid Films. — 2015. — Vol. 591. — P. 316–322.
- 30 Yurov V.M., Laurinas V.Ch., Guchenko S.A., Zavatskaya O.N. The surface tension of hardening coatings // Strengthening technology and coatings. — 2014. — № 1. — P. 33–36.

В.Ч.Лауринас, А.Ш.Сыздыкова, Е.Н.Еремин, С.А.Гученко, В.М.Юров

Қоспалы болат қабыршақтарының тотығу тұрақтылығы және қызуға төзімділігі

Мақалада композициялық катодтар мен 12Х18Н10Т болаттан катодты бірқалыпты ыдырату кезінде зерттелген жабындыларға ионды-плазмалық әдіспен енгізілгендігі туралы айтылған. Неғұрлым беттік керілудің жабындысы көп болса, соғұрлым оның қызуға төзімділігі жоғары болатындығы көрсетілген. Сондай-ақ металдың беттік керілуі балқудың қызуына пропорционал, осыдан қызуға төзімділік, біріншіден, металдың балқу қызуына тәуелді. Металдың балқу температурасы неғұрлым жоғары болған сайын, соғұрлым оның рекристалдану температурасы да жоғары. Экспериментте көрсетілгендей, неғұрлым беттік керілуі жоғары болса, соғұрлым оның тотығуға төзімділігі тұрақты.

В.Ч.Лауринас, А.Ш.Сыздыкова, Е.Н.Еремин, С.А.Гученко, В.М.Юров

Жаропрочность и коррозионная стойкость легированной стальных покрытий

В статье отмечено, что исследованные покрытия наносились ионно-плазменным методом при одно-временном распылении катода из стали 12Х18Н10Т и композиционных катодов. Определено, что чем больше поверхностное натяжение покрытия, тем больше его жаропрочность. Поскольку поверхностное натяжение металла пропорционально его температуре плавления, то отсюда следует, что жаропрочность, в первую очередь, зависит от температуры плавления металла. Чем выше температура плавления металла, тем выше его температура рекристаллизации. В работе экспериментально показано, что чем больше поверхностное натяжение покрытия, тем больше его коррозионная стойкость.

ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 51-74

А.Е.Бакланов¹, С.В.Григорьева¹, А.Н.Яковлев²

¹Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск;

²Гомский политехнический университет, Россия

(E-mail: yakovlev_an@tpu.ru)

Математическое моделирование тепломассопереноса в системе теплоотвода для светодиода высокой мощности

В статье рассматривается тепломассоперенос в системе «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух» на основе нестационарных дифференциальных уравнений, описывающих комплекс взаимосвязанных процессов тепломассопереноса. Предлагается алгоритм численного решения уравнений Пуассона, позволяющий получать время прохождения исследуемого процесса, предельные токовые нагрузки, критические внешние условия и температурные режимы работы светодиода. Представлены экспериментальные результаты распределения температуры в реальных осветительных приборах.

Ключевые слова: тепломассоперенос, уравнения Пуассона, светодиод, кристаллик, полупроводник, температурный режим, моделирование.

С появлением мощных белых светодиодов открылась возможность их использования в энерго-сберегающих системах освещения. Эффективность таких систем по сравнению с традиционными люминесцентными лампами выше в два–три раза. Однако при эксплуатации светодиодных осветительных приборов выяснилось, что в реальных условиях при токах 350 – 700 мА и мощностях 1–3 Вт сложно обеспечить оптимальный теплоотвод. В связи с этим большинство осветительных приборов имеют срок службы в десятки раз меньше заявленного срока эксплуатации производителем. Это происходит из-за появления деградации кристаллика светодиода, связанной с повышенной рабочей температурой светодиодов.

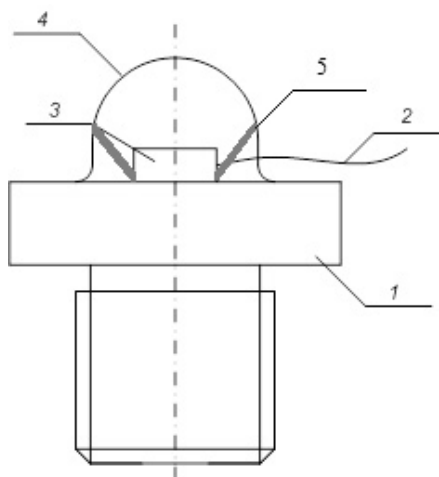
Традиционно расчет теплоотвода от светодиода осуществляется с использованием приближенных формул, полученных и используемых для расчета радиаторов полупроводниковой элементной базы. Однако из-за введенных приближений в этих формулах не всегда расчеты отражают реальную картину распространения тепла в системе «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух». В связи с этим нами была предложена и численно подсчитана задача тепломассопереноса в светодиоде с использованием уравнений Пуассона.

Рассмотрим процесс теплопереноса в типичном светодиоде. Известно [1, 2], что строение светодиода определяет мощность излучения, зависящую от прямого тока. Световой поток, излучаемый светодиодом, напрямую зависит от прямого тока, протекающего через изделие. Чем больше ток, тем больше поток излучения светодиода. Это связано с тем, что с увеличением тока растет число электронов и дырок, поступающих в зону рекомбинации в единицу времени. Но ток нельзя увеличивать до больших значений. Из-за внутреннего сопротивления полупроводника и $p-n$ перехода кристаллик перегревается и диод может выйти из строя. Кроме того, на температурный режим светодиода влияют внешние условия (температура, влажность и т.д.) функционирования полупроводникового элемента. Так, например, известны [3, 4] достаточно существенные масштабы влияния температуры окружающей среды на электрические (прямое напряжение, потребляемая энергия), энергетические (осевая сила света, световой поток, оптическая мощность) и калориметрические (относительное спек-

тральное распределение света, относительная спектральная световая эффективность и т.д.) характеристики работы светодиодов.

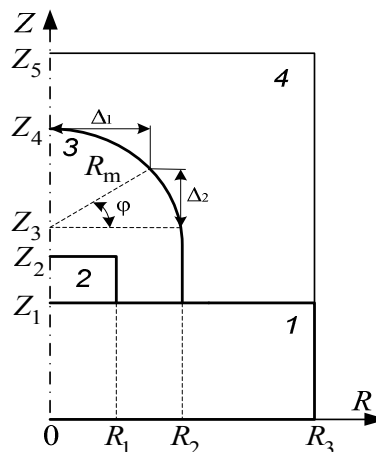
Цель выполнения численного анализа рассматриваемого процесса — определение оптимальных тепловых условий эксплуатации светодиода, создание рекомендаций по рациональному выбору материалов для изготовления комплектующих и уменьшению износа полупроводникового изделия вследствие изменения тепловых условий функционирования излучающего кристаллика.

Рассматривается конструкция типового светодиода, схема которого представлена на рисунке 1.



1 – основание – катод; 2 – проводник – анод;
3 – кристаллик; 4 – линза; 5 – рефлектор

Рисунок 1. Устройство типового светодиода



1 – основание; 2 – кристаллик; 3 – компаунд в линзе;
4 – окружающий воздух

Рисунок 2. Схема области решения задачи
теплопереноса

При физической постановке задачи учитываются следующие процессы. При протекании тока через $p-n$ переход в кристаллике происходит выделение энергии в форме излучения. Как следствие, кристаллик нагревается. За счет рефлектора излучения в основание не происходит, и лучи отражаются. Таким образом, формируются потоки излучения от кристаллика, которые фокусируются линзой. За счет теплопроводности и излучения основание и оптически прозрачный полимерный корпус (линза), заполненный компаундом, нагреваются. С течением времени степень нагрева кристаллика, основания и фокусирующей линзы возрастает. Это в предельных случаях может приводить к плавлению кристаллика и последующему выходу из строя светодиода.

Одной из задач теоретического исследования может быть установление предельных значений токов и времени функционирования светодиода без перегрева комплектующих элементов. Предварительный анализ показывает, что это возможно при численном решении задачи теплопереноса, так как натурный и лабораторный эксперименты требуют больших затрат времени и материальных ресурсов.

Рассматривается осесимметричная постановка (рис. 2). Учитываются два механизма теплопереноса в светодиоде: излучение и теплопроводность. При этом не учитываются преломление, поглощение, рассеивание и фокусировка лучей линзой, а также зависимость теплофизических характеристик от температуры. Для области окружающего светодиод воздуха учитываются два механизма теплопереноса: конвекция и теплопроводность.

Предполагается, что пространство внутри линзы заполнено однородной средой – компаундом с постоянными теплофизическими характеристиками. Это допущение является типичным при моделировании процессов теплопереноса в оптических элементах и не накладывает существенных ограничений на общность постановки задачи.

Из рисунка 2 видно, что основную трудность при моделировании процессов теплопереноса представляет конфигурация светодиода. Реализация алгоритма численного решения предусматривает достаточно трудоемкое сопряжение сферической (полярной) и цилиндрической координатных сеток. К тому же важную роль играют форма рефлектора, ширина «запрещенной» зоны кристаллика и ее

изменение с ростом температуры. Следует подчеркнуть, что при моделировании рассматриваются наиболее типичные конфигурации фокусирующей линзы и рефлектора.

Рассмотрим математическую модель. Система нестационарных дифференциальных уравнений, описывающих комплекс взаимосвязанных процессов тепломассопереноса, протекающих в системе «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух», соответствующая сформулированной физической постановке задачи, имеет следующий вид.

Уравнение энергии для основания ($0 < R < R_3, 0 < Z < Z_1$):

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right). \quad (1)$$

Уравнение энергии для кристаллика ($0 < R < R_1, Z_1 < Z < Z_2$):

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{V_{cr} t}. \quad (2)$$

Уравнение энергии для компаунда линзы в цилиндрической части ($R_1 < R < R_2, Z_1 < Z < Z_2; 0 < R < R_2, Z_2 < Z < Z_3$):

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right). \quad (3)$$

Уравнение энергии для компаунда линзы в сферической части ($0 < \varphi < \varphi_m, 0 < R < R_m$):

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_3}{\partial \varphi^2} \right). \quad (4)$$

Уравнения энергии, движения и неразрывности для окружающего воздуха ($R_2 < R < R_3, Z_1 < Z < Z_3; \Delta_1 < R < R_3, Z_3 + \Delta_2 < Z < Z_4; 0 < R < R_3, Z_4 < Z < Z_5$):

$$\rho_4 C_4 \left(\frac{\partial T_4}{\partial t} + u \frac{\partial T_4}{\partial r} + v \frac{\partial T_4}{\partial z} \right) = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_4}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{u}{r} = -\frac{1}{\rho_4} \frac{\partial P_4}{\partial r} + \nu_4 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{u}{r^2} \right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_4} \frac{\partial P_4}{\partial z} + \nu_4 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \beta g (T_4 - T_0), \quad (7)$$

$$\frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial(zv)}{\partial z} = 0. \quad (8)$$

Здесь u, v — составляющие скорости конвекции воздушных потоков в проекции на ось r и z в цилиндрической системе координат, м/с; r, z — координаты цилиндрической системы координат; r, φ — координаты сферической системы координат; R_m — радиус сферической части линзы ($R_m = R_2$); φ_m — масштаб по сферической координате ($\varphi_m = \pi/2$); t — время, с; ρ — плотность, кг/м³; P — давление, Н/м²; ν — кинематическая вязкость, м²/с; β — коэффициент термического расширения, К⁻¹; g — ускорение свободного падения, м/с²; T — температура, К; T_0 — начальная температура, К; C — удельная теплоёмкость, Дж/(кгК); λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(мК); V_{cr} — объем кристаллика, м³; Q — количество тепла, выделяемое в кристаллике при протекании электрического тока, Дж.

По закону Джоуля-Ленца количество тепла, выделяемое в кристаллике при протекании электрического тока, можно определить из следующего выражения [5]:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t, \quad (9)$$

где I — сила тока, А; R — электрическое сопротивление, Ом; t — время, с.

Поскольку целью настоящего исследования является анализ теплового состояния сложной полупроводниковой системы – светодиода, то наиболее целесообразным представляется преобразование сформулированной системы дифференциальных уравнений (1)–(8) к виду, исключающему непосредственный поиск поля давления P .

Для этого вводятся в рассмотрение функция тока ψ и вектор вихря скорости ω , которые задаются следующим образом [6, 7]:

$$u = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z}, v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r}, \omega = \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (10)$$

После подстановки выражений для компонентов скорости u, v (10) в уравнение неразрывности (8) получаем уравнение Пуассона следующего вида:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = -r\omega. \quad (11)$$

Уравнение движения в переменных «функция тока — вектор вихря скорости» имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial r} + v \frac{\partial \omega}{\partial z} - u \frac{\omega}{r} = v \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) + g\beta \frac{\partial T}{\partial r}. \quad (12)$$

Анализ приведенных нелинейных нестационарных уравнений (11), (12) показывает, что целесообразно применение безразмерной формы записи дифференциальных уравнений для уменьшения числа параметров, от которых зависит решение.

При переходе к безразмерным переменным в качестве масштабов расстояния, времени, скорости, температуры, функции тока и завихренности выбраны:

$$\begin{aligned} R &= \frac{r}{z_m}, Z = \frac{z}{z_m}; \\ \tau &= \frac{t}{t_m}, t_m = \frac{z_m}{V_m}, V_m = \sqrt{g\beta\Delta T z_m}; \\ U &= \frac{u}{V_m}, V = \frac{v}{V_m}; \\ \Theta &= \frac{T - T_0}{\Delta T}, \Delta T = T_m - T_0; \\ \Psi &= \frac{\Psi}{\Psi_m}, \Omega = \frac{\omega}{\omega_m}, \Psi_m = V_m z_m^2, \omega_m = \frac{V_m}{z_m}, \end{aligned}$$

где t_m — масштаб времени, с; z_m — масштаб расстояния, м ($z_m = z_5$); V_m — масштаб скорости, м/с; T_m — масштаб температуры, К; Ψ_m — масштаб функции тока, м²/с; ω_m — масштаб вектора вихря, с⁻¹; τ — безразмерное время; U, V — безразмерные составляющие скорости конвекции в проекции на оси цилиндрической системы координат r и z ; Θ — безразмерная температура; Ψ — безразмерный аналог функции тока; Ω — безразмерный аналог вектора вихря.

Таким образом, процессы тепломассопереноса в системе «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух» в безразмерных переменных описывает следующая система уравнений.

Для основания ($0 < Z < Z_1, 0 < R < R_3$)
уравнение энергии

$$\frac{1}{Fo_1} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Z^2}.$$

Для кристаллика ($Z_1 < Z < Z_2, 0 < R < R_1$)
уравнение энергии

$$\frac{1}{Fo_2} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Z^2} + \frac{Qr_m}{V_{cr} \Delta T \lambda_2 t}.$$

Для наполнителя (компаунда) в цилиндрической части линзы при $Z_1 < Z < Z_2, R_1 < R < R_2; Z_2 < Z < Z_3, 0 < R < R_2$

уравнение энергии

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\partial \Theta_3}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_3}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial Z^2}.$$

Для наполнителя (компаунда) в сферической части линзы при $0 < R < R_m, 0 < \phi < \phi_m$:
уравнение энергии

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\partial \Theta_3}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_3}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial \phi^2}.$$

Для воздуха вне линзы при $Z_1 < Z < Z_3$, $R_2 < R < R_3$; $Z_3 < Z < Z_4$, $R_2 - \Delta_1 < R < R_3$; $Z_4 < Z < Z_5$, $0 < R < R_3$: уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = -R\Omega;$$

уравнение завихренности

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Omega}{\partial R} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Z} - U \frac{\Omega}{R} = \sqrt{\frac{Pr_4}{Ra_4}} \left[\frac{\partial^2 \Omega}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Omega}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Z^2} - \frac{\Omega}{R^2} \right] + \frac{\partial \Theta_4}{\partial R};$$

уравнение энергии

$$\frac{1}{Sh} \frac{\partial \Theta_4}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta_4}{\partial R} + V \frac{\partial \Theta_4}{\partial Z} = \frac{1}{\sqrt{Ra_4 Pr_4}} \left[\frac{\partial^2 \Theta_4}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_4}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_4}{\partial Z^2} \right].$$

Здесь Fo , Sh , Pr , Ra — безразмерные комплексы (число Фурье $Fo = \frac{\lambda t_m}{\rho C z_m^2}$, число Струхалия

$$Sh = \frac{V_m t_m}{z_m}, \text{ число Прандтля } Pr = \frac{\nu C \rho}{\lambda}, \text{ число Рэлея } Ra = \frac{\beta g \Delta T z_m^3 C \rho}{\lambda \nu}.$$

Рассмотрим алгоритм численного моделирования.

1. На первом шаге по времени строится итерационный цикл для определения температурного поля в рассматриваемой системе. В качестве начального приближения задается значение сеточной функции на предшествующем временном слое. Итерационный цикл заканчивается при условии

$$\max |\Theta^{(s)} - \Theta^{(s-1)}| \leq \delta,$$

где δ — заданное малое число; s — номер итерации.

Если в результате итерационного цикла требуемая точность вычислений не достигается, то полученное приближение $\Theta^{(s)}$ задается в качестве начального в систему разностных аналогов уравнений энергии и теплопроводности для определения очередного приближения $\Theta^{(s-1)}$. При достижении заданной точности вычислений выполняется переход к следующему временному слою.

Для достижения сходимости итерационного цикла в условиях высоких скоростей теплопереноса традиционная схема итерационного алгоритма дополняется процедурой «усреднения итераций». Вводится итерационный коэффициент последовательного усреднения γ . В этом случае значение искомой функции $\Theta_*^{(s+1)}$, вводимое на каждой итерации в качестве последнего приближения в соответствующие разностные операторы, отличается от фактически вычисленного на последней итерации значения $\Theta^{(s+1)}$ и вычисляется для каждого узла итерационной сетки по следующей формуле:

$$\Theta_*^{(s+1)} = \Theta^{(s)} + \gamma (\Theta^{(s+1)} - \Theta^{(s)}), \quad 0 < \gamma < 1.$$

Введение такой процедуры приводит к существенному снижению скорости сходимости итераций в процессе решения задачи, но обеспечивает сходимость.

В выполняемых расчетах точность вычислений температуры принимается равной 0,5 К ввиду минимально возможной в такой постановке температуры $\Theta = 0,3$.

2. При известных значениях температуры в каждом узле пространственной сетки вычисляется значение функции тока Ψ .

3. По найденным значениям функции тока Ψ и температуры в каждом узле сетки итерационным путем определяются значения вектора вихря скорости Ω .

4. По значениям вектора вихря скорости Ω и функции тока Ψ вычисляются компоненты скорости конвекции воздушных потоков U и V по выражениям (10).

5. Для контроля точности проводимых вычислений в каждом узле сетки выполняется оценка достоверности полученных результатов по результатам анализа консервативности разностной схемы.

6. Затем проверяются условия окончания вычислений по превышению температуры кристаллика предельных значений (температур плавления компаунда, кристаллика, основания). В случае невыполнения условий окончания вычислений выполняется переход на следующий временной слой и определяются поля температуры, функции тока, вектор вихря скорости, проверяется достоверность полученных результатов и условий окончания вычислений по пунктам 1–6 данного алгоритма. В слу-

чае выполнения условий окончания вычислений определяется время прохождения исследуемого процесса, предельные токовые нагрузки, критические внешние условия и температурные режимы работы светодиода.

На основании проведенных предварительных расчетов была разработана конструкция светодиодного светильника типа «Armstrong». Использовались светодиоды от производителей Nichia и LG со следующими характеристиками (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Характеристики светодиодов

Характеристика	LG 3030N	NS6W183B	NVSL219B
Мощность светодиода, Вт	0,609	1,05	2,16
Сила тока, мА	100	350	700
Световой поток, лм	78	147	278
Световая отдача, лм/Вт	128	140	128
Размеры, мм	3.0x3.0x2.0	6.5x5.0x1.35	3.5x3.5x2.0

Дальнейшее изучение температурных режимов всей конструкции светодиодного прибора сводилось к расчету температурных полей спроектированной компьютерной модели. По предлагаемой концепции было использовано приложение CAD системы Solid Works Flow Simulation. Flow Simulation позволяет рассчитывать тепломассообмен конструкции в газообразной и жидкой среде, при этом учитываются аэрогидродинамические свойства поверхностей конструкции. Результатами расчетов являются: распределение температуры в любом сечении конструкции и среды, скорости и формы потоков среды (воздуха), коэффициент теплопередачи от любой поверхности конструкции в среду. Возможности Flow Simulation позволяют за некоторое количество итераций оптимизировать тепловую конструкцию осветительного прибора. Изменяя форму поверхностей, зазоры и толщину, можно добиться компромиссного решения между массогабаритными требованиями и тепловыми, при этом не забывая о реальности конструкции.

1 расчет. Для первого расчета использовались светодиоды Nichia NVSL219B.

На рисунке 3 показано температурное поле модели светодиодного светильника, работающего при токе $I = 0,7A$ и температуре окружающей среды $T = 25^{\circ}C$. Максимальная температура на корпусе светодиодных матриц составила $35,2^{\circ}C$.

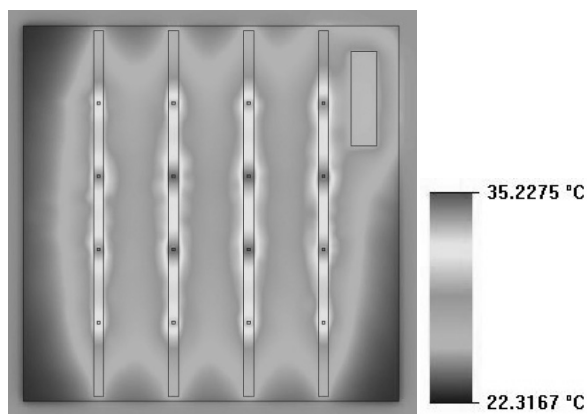


Рисунок 3. Температурное поле светильника со светодиодами Nichia NVSL219B

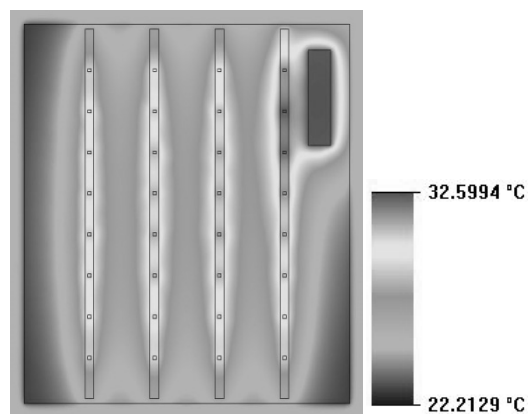


Рисунок 4. Температурное поле светильника со светодиодами Nichia NS6W183B

2 расчет. Во втором случае использовались светодиоды Nichia NS6W183B.

На рисунке 4 показано температурное поле модели светодиодного светильника, работающего при токе $I = 0,35A$ при температуре окружающей среды $T = 25^{\circ}C$. Максимальная температура на корпусе светодиодных матриц составила $32,6^{\circ}C$.

3 расчет. В данном расчете использовались светодиоды LG3030N, работающие на малом токе.

На рисунке 5 представлено температурное поле модели светодиодного светильника, работающего при токе $I = 0,1\text{A}$ и температуре окружающей среды $T = 25^\circ\text{C}$. Максимальная температура на корпусе светодиодных матриц составила 38°C .

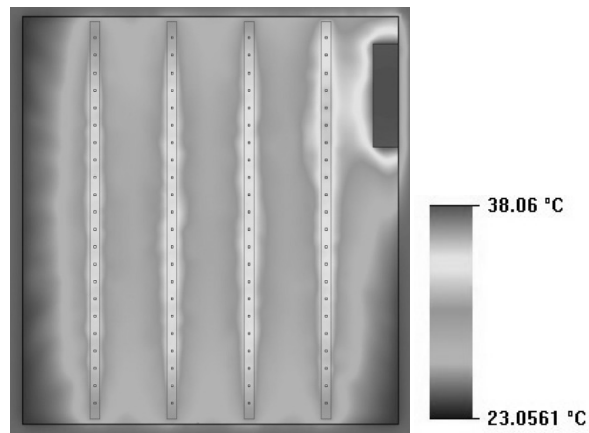


Рисунок 5. Температурное поле светильника со светодиодами LG3030N

По результатам расчетов была составлена таблица 2, наглядно демонстрирующая различия при выборе определенных светодиодов и их режимов работы при проектировании осветительных приборов.

Т а б л и ц а 2

Характеристики осветительных приборов

Характеристика	1 расчет	2 расчет	3 расчет
Светодиоды	NVSL219B	NS6W183B	LG 3030N
Мощность светильника, Вт	38	37	59
Световой поток светодиодов, Лм	4448	4704	6864
Кол-во светодиодов, шт.	16	32	88
Стоимость светодиодов, тенге	4119	6540	3240

Анализируя расчеты компьютерных моделей, можно сделать несколько выводов.

1. В офисном освещении предпочтительно использовать светодиоды, работающие на малом токе (0,1А). Сравнивая расчеты, видно, что светильник, изготовленный с использованием светодиодов LG 3030N, имеет большую светоотдачу в 1.5 раза (без учета потерь), большую мощность, но при этом температура на корпусе светодиодов различается на 6 градусов. Такая небольшая разница объясняется равномерностью распределения светодиодов LG по поверхности теплоотвода (корпуса), а также меньшей мощностью каждого светодиода.

2. Светодиоды малой мощности <1Вт могут стоить в разы дешевле мощных светодиодов и при этом превосходить их в световом потоке.

3. Анализируя тепловые поля всех проведенных расчетов, целесообразно располагать пускорегулирующее устройство (драйвер) не внутри светильника, а снаружи. Расположение драйвера внутри создает дополнительные оптические потери и неравномерную яркость на рассеивателе, а расположение снаружи способствует лучшему охлаждению источника питания, а значит, более эффективной и надежной работе светильника. Также размещение источника питания снаружи упрощает обслуживание (ремонт) светильника.

Для проведения натурального эксперимента для рассмотрения тепловых потоков в системе «светодиоды – корпус светильника – окружающая среда» был изготовлен макет светильника типа «Armstrong» с 16-ю светодиодами NVSL219B и потребляемой мощностью 38,5Вт при токе $I = 0,35\text{A}$. Максимальная температура светильника была измерена термопарой и составила 34°C . На основании этого можно сделать вывод, что разработанная модель светильника является достаточно достоверной и позволяет считать результаты компьютерного моделирования верными.

Используя предложенную методику расчета тепломассопереноса в системе «основание светодиода – кристаллик – линза – окружающий воздух», можно создавать конструкции новых светильников, которые по анализу распределения температурных полей обеспечат долговременную работу осветительных приборов в соответствии с заявленным временем работы порядка 50 тыс. часов.

Работа выполнена в рамках выполнения госбюджетной НИР «Оптимизация энергопотребления в светодиодных установках совмещенного освещения с автоматизированным управлением: алгоритмы, программное обеспечение, демонстрационный макет на ЭКСПО-2017».

Список литературы

- 1 Мосс Т., Баррел Г., Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника. — М.: Мир, 1976. — 214 с.
- 2 Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир, 1984. — 456 с.
- 3 Давиденко Ю. Современные светодиоды // Компоненты и технологии. — 2004. — № 5. — С. 12–16.
- 4 Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов // Компоненты и технологии. — 2005. — № 9. — С. 140–46.
- 5 Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. — М.: Наука, 1977. — 704 с.
- 6 Роуч П.Дж. Вычислительная гидродинамика. — М.: Мир, 1980. — 618 с.
- 7 Джалаурия Й. Естественная конвекция: тепло- и массообмен. — М.: Мир, 1983. — 399 с.

А.Е.Бакланов, С.В.Григорьева, А.Н.Яковлев

Жоғарғы қуатты жарық диоды үшін жылу жүйесіндегі жылу массасын тасымалдауды математикалық модельдеу

Жұмыс барысында жылу массасын тасымалдау «жарық диодының тұрақтануы – кристалл – линза — қоршаған орта ауасы» стационарлы емес дифференциалдық теңдігінде негізделді, жылу массасының тасымалдау процесімен байланысқан комплексімен сипатталды. Пуассон теңдігінің шешімі сандық алгоритм түрінде берілген және зерттелетін процестің уақыт өту мүмкіндігі, ток жүктемесінің шегі, жарық диодының жұмысы критикалық ішкі шартымен температура режиміне байланысты. Берілген эксперименттің тарату нәтижесі температураның нақты жарықтандыру аспабында көрсетілді.

A.E.Baklanov, S.V.Grigoryeva, A.N.Yakovlev

Mathematical modeling of heat-and-mass transfer in the heat sink system for the high power LED

In this paper we consider the heat and mass transfer in the «base of the LED – crystal – lens – ambient air» on the basis of non-stationary differential equations that describe the complex of interrelated processes. We propose an algorithm for numerical solution the Poisson equations that allows to receive the time of the test process, limit current loads, critical external conditions and the temperature operating modes of the LED. The experimental results of the temperature distribution in real lighting devices are presented.

References

- 1 Moss T., Barrel G., Allis B. *Semiconductor Opto-Electronics*, Moscow: Mir, 1976, 274 p.
- 2 Sze S. *Physics of Semiconductor Devices*, Moscow: Mir, 1984, 456 p.
- 3 Davydenko Yu. *Components and technologies*, 2004, 5, p. 12–16.
- 4 Nikiforov S. *Components and technologies*, 2005, 9, p. 140–146.
- 5 Sivukhin D.V. *The general course of physics. Electricity*, Moscow: Nauka, 1977, 704 p.
- 6 Roache P.J. *Computational fluid dynamics*, Moscow: Mir, 1980, 618 p.
- 7 Jaluria Y. *Natural Convection: heat and mass transfer*, Moscow: Mir, 1983, 399 p.

N.N.Shuyushbayeva¹, K.Kussaiynov², M.Stoev³, K.M.Shaimerdenova²,
D.A.Ospanova², B.A.Akhmadiev², K.K.Sadenova²

¹*Sh.Ualikhanov Kokshetau State University;*

²*Ye.A.Buketov Karaganda State University;*

³*South-West University «Neofit Rilsky», Blagoevgrad, Bulgaria*

(E-mail: nn_shuish@mail.ru)

Study of regularities of changes in the temperature near the *U*-shaped ground heat exchangers

The article considers the results of a study heat transfer process is in ground heat exchangers, used for geothermal heat pumps. At the research facility performed experiments and calculations, confirming about the best of thermophysical indicators of moistened of sand. The experimentally determined the temperature distribution regularities in a neighborhood *U*-shaped of underground heat exchangers.

Key words: renewable energy, heat pumps, underground heat exchangers, the temperature distribution.

At the use of the low potential renewable energy of ground via of geothermal heat pumps for heating and cooling of buildings with one of the main elements is a underground of heat exchanger. Analysis of different types of ground heat exchangers showed that the best thermal and operating characteristics possess of the heat exchangers installed in vertical wells, which in tubes circulates low interest ethylene glycol solution as antifreeze [1, 2].

The vertical ground heat exchanger efficiently works practically in all types of geological environments, except for soils with low heat conductivity, for example, of dry sand or dry gravel. The systems with the vertical ground heat-exchanger do not require the areas of large area and does not depend on intensity of solar radiation falling on a surface. The systems with the vertical ground heat-exchangers got very wide distribution [3–5].

In works [6–8] a mathematical model and experiment, offered extraction of geological heat vertical heat exchangers. Studies of process of freezing of ground undertaken by means of smooth and finned thermal pipes. However, authors hired for research of heat exchange use not polyethylene pipes.

The main advantages of polyethylene pipes are: high durability and inflexibility allow pipes to maintain intrinsic pressure to 1,6 MPa and external loading of soils; resistance to chemical influence of aggressive soils and chemicals; the low coefficient of elastic modulus of material allows to reduce the maximal size of dynamic pressure during hydroblows; there is not necessity of external isolation of pipelines from corrosion and arrangement of electrochemical protection; flexibility, inflexibility, light weight and high impact resistance facilitate installation, reduce expenses; the calculated serviceable life of polyethylene pipelines makes 50 years [8].

Bearing in mind the foregoing characteristics of polyethylene pipes and irresistibility of metal pipes to chemical influence of aggressive soils and chemicals, we consider actual use of polyethylene pipes in creation of heat exchangers.

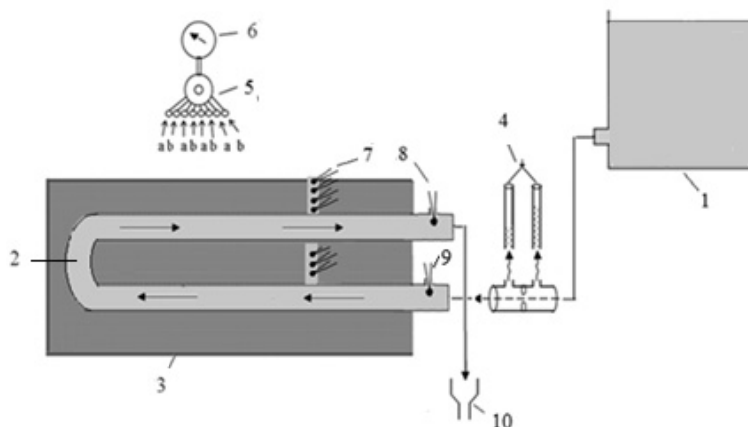
The main purpose of the work is research of heat exchangers of tubular elements of ground heat exchangers. For gaining of the purpose it is necessary to define dependences of temperature distribution in soil in the vicinity of the pipe, and also to get change of temperature on time in dry and wet soils.

The parameters of the heat-exchange setting of type are examined «ground-water» for research of heat exchange an experimental way: expense of cold streams and difference of temperature of the chilled soil by means of thermal pipes. For this purpose it is necessary to develop and create the experimental unit, to carry out experiments of the main characteristics of process of heat transfers.

Border terms for the calculation of experiment: input temperature of cold water $t_{\text{input}} = 10$ °C, soil temperature on the site of the studied pipe input $t_s = 23$ °C. An ambient temperature made 23 °C.

For the achievement the purpose set at the laboratory of hydrodynamics and heat exchange the experimental stand for model operation of process of heat exchange in heat removable elements of heat pump in soil water systems was assembled.

The experimental stand is shown in figure 1.



1 — a tank with water; 2 — a pipe; 3 — heat-section of with the ground; 4 — differential manometers;
 5 — switch is thermocouples; 6 — potentiometer for measuring the EMF of thermocouples;
 7 8 9 — thermocouples; 10 — municipal sewer spill pipe

Figure 1. An experimental stand for the simulation of heat transfer in heat pulling elements of the heat pump for systems of «ground-water»

The stand consists of two contours: 1) the internal contour with heat removable pipe of the heat pump; 2) the external contour of the heat giving site with sand. The internal contour with heat removable pipe of heat pump consists of thermostat, flow-measuring washer, heat removable site and differential pressure manometer. External diameter of a heat removable pipe of heat pump is 32 mm, thickness is 3,5 mm. At the beginning and at the end of the studied pipe thermocouples are installed. The external contour includes heat-transmitting site with soil in the form of the cylinder with a diameter of 600 mm. Also the system comprises the switch of thermocouples, thermocouples, potentiometer for the EMF of thermocouples and the tap of adjustment of expense of the heat carrier.

Carrying out experiment. Cold water from the tank enters to the heat removable pipe of the heat pump. The consumption of cold water is regulated by the tap, and the differential pressure manometer shows the speed of the arriving liquid in the heat removable pipe which is located on the center of the cylindrical module with a length of 5m filled with soil. The tank imitates a well which is filled at first with a dry soil, and then it is humidified at the different percentage by water mass. Percentage of water weight in sand made 0,5%, 1%, 2%, 5% and 10%. For monitoring of temperatures the thermocouples attached to the ruler at different distances from the pipe surface are installed. They show distribution of temperatures in soil in the vicinity of the pipe. Experiments were made in the site where there is hydrodynamic stabilization of liquid.

The parameters of heat transfer are determined by the obtained experimental data and the schedules of dependence shown in figures 2 and 3 are constructed.

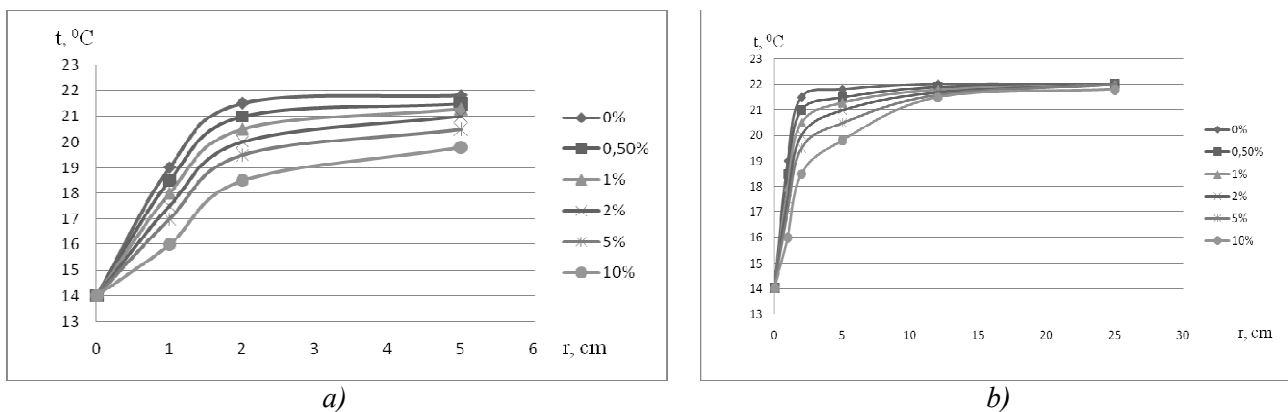


Figure 2. Schedule of temperature dependence on radius: a) - $0 \leq r \leq 5$ cm; b) - $0 \leq r \leq 25$ cm

In figure 2 the graphic changes of temperature are represented at different radial distances. From the schedule it is visible that at the closest distance of 0 – 2 cm change of temperature in different humidities of soil is parallel as the diameter of the cylinder changes to 6 cm temperature increases. In some moment the temperature of the soil is equated to ambient temperature. From figure 3 it is seen that distribution of temperature in the soil decreases relatively from distance which is counted from the pipe surface. It is known that heat conductivity sharply increases in the process of increase in humidity of soil as heat conductivity of the air which is forced out by water from rock pores is about 30 times less than heat conductivity of water.

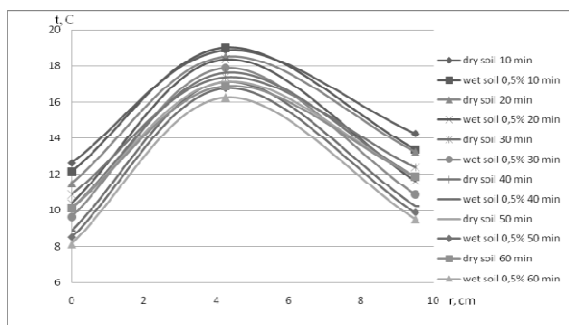


Figure 3. Changes of temperatures in the sand between the U-shaped tube of the heat exchanger

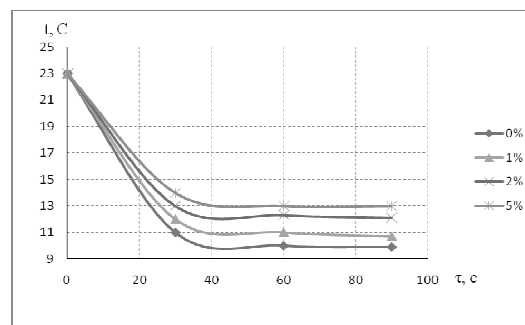


Figure 4. The change in temperature by time

Figure 3 shows the change in temperature across the sand moisture between the U-shaped heat exchanger tubes. The incoming flow of liquid temperature varies more than in the tube with the opposite direction of the fluid.

From schedules in figure 4 we see that the difference of temperature of soil decreases with increase of humidity. In figure 4 dependence of temperature of soils with various humidity on time is shown. In dry soil temperature changes by about 12 °C per hour, and in the wet soil only by 7 °C and 9 °C. From this it follows that the wet soil increases heat removal.

As now there are no heat exchangers for extraction of heat from soil, such systems have to be designed for each concrete object separately. It should be noted that from the point of view of thermal physics the soil is the quite composite system.

By means of experiment studies on stands the dependences of temperature change of dry and wet soils on time and distribution of temperatures in soil in the vicinity of the polyethylene pipe used as heat removable elements of the heat pumps. The carried out experiments confirmed that on dry soil change of temperature will be more, than on the wet. It gives the chance of application the wet soil as filler of wells of ground heat exchangers.

References

- 1 Васильев Г.П. Использование низкопотенциальной тепловой энергии грунта поверхностных слоев Земли для теплохладоснабжения здания // Теплоэнергетика. — 1994. — № 2. — С. 31–35.
- 2 Бондарь Е.С., Калугин П.В. Тепловой насос — энергетически эффективная составляющая систем кондиционирования воздуха // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». — 2008. — № 5.
- 3 Stoev M., Kussaiynov K., Shuyushbayeva N.N., Nurgalieva Zh.G., Ahmadiyev B.A. Investigation of heat transfer in tubular elements of ground heat exchangers // Вестн. Караганд. ун-та. — 2014. — № 2 (74). — P. 57–61.
- 4 Kussaiynov K., Shuyushbayeva N.N., Stoev M., Shaimerdenova K.M., Ospanova D.A., Akhmediyev B.A. Research the Processes of Heat Exchangers of the Soil of Different Humidities // Proceedings of the Fifth: International Scientific Conference. — Blagoevgrad, 2015. — P. 59–65.
- 5 Kussaiynov K., Sakipova S.E., Shuyushbayeva N.N., Ahmadiyev B.A., Kuzhuanova J.A. Electro-pulse technology of production heat exchangers for extracting the heat from the ground at shallow depths // Eurasian Physical Technical Journal. — 2012. — Volume 9. — No 2 (18). — P. 19–23.
- 6 Накорчевский А.И., Недбайло Н.А., Басок Б.И. Экспериментальное исследование переходных процессов при грунто-вом аккумулировании теплоты // Тр. Четвертой Российской нац. конф. по теплообмену. — 2006. — Т. 7. — С. 290–293.
- 7 Васильев Е.Н., Деревянко В.А., Макуха А.В. Исследование процесса замораживания грунта с помощью тепловых труб // Тр. Четвертой Российской нац. конф. по теплообмену. — 2006. — Т. 7. — С. 175–178.
- 8 Kussaiynov K., Shuyushbayeva N.N., Shaimerdenova K.M., Nurgalieva Zh.G., Omarov N.N. Study of the Heat-Transfer Processes of Tubular Elements of Ground Heat Exchangers // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2015. — Vol. 88. — No 3. — P. 676–680.

Н.Н.Шуюшбаева, К.Құсайынов, М.Стоев, К.М.Шаймерденова,
Д.А.Оспанова, Б.А.Ахмадиев, К.К.Саденова

U-тәрізді жер асты жылуалмастырғыштары маңындағы температураның өзгерісін зерттеу

Мақалада геотермалды жылу сорғыларында қолданылатын жер асты жылуалмастырғыштарындағы жылуалмасу үдерістерін зерттеу нәтижелері қарастырылған. Зерттеу қондырғысында тәжірибелер жүргізіліп, ылғал құмның ең жақсы электрофизикалық параметрлерін дәлелдейтін есептеулер келтірілген. U-тәрізді жер асты жылуалмастырғыштарының маңындағы температуралардың таралу заңдылықтары тәжірибелер жүзінде анықталды.

Н.Н.Шуюшбаева, К.Кусаиынов, М.Стоев, К.М.Шаймерденова,
Д.А.Оспанова, Б.А.Ахмадиев, К.К.Саденова

Исследование изменения температуры в окрестности U-образного грунтового теплообменника

В статье рассматриваются результаты исследования процесса теплообмена в грунтовых теплообменных аппаратах, используемых для геотермальных тепловых насосов. На исследовательской установке проведены эксперименты и выполнены расчеты, подтверждающие лучшие теплофизические показатели увлажненного песка. Экспериментально определены закономерности распределения температуры в окрестности u-образного грунтового теплообменника.

References

- 1 Vasilyev G.P. *Teploenergetika*, 1994, 2, p. 31–35.
- 2 Bondar E.S., Kalugin P.V. *Electronic Journal of Energy Service Company «Ecological Systems»*, 2008, 5.
- 3 Stoev M., Kussaiynov K., Shuyushbayeva N.N., Nurgalieva Zh.G., Ahmadiyev B.A. *Vestnik of the Karaganda University*, 2014, 2, 74, p. 57–61.
- 4 Kussaiynov K., Shuyushbayeva N.N., Stoev M., Shaimerdenova K.M., Ospanova D.A., Akhmadiev B.A. *Proceedings of the Fifth: International Scientific Conference, Blagoevgrad*, 2015, p. 59–65.
- 5 Kussaiynov K., Sakipova S.E., Shuyushbayeva N.N., Ahmadiyev B.A., Kuzhuhanova J.A. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2012, 9, 2 (18), p. 19–23.
- 6 Nakorchevsky A.I., Nedbaylo N.A., Basok B.I. *Proceedings of the Fourth Russian National Conference on Heat Transfer*, 2006, 7, p. 290–293.
- 7 Vasilyev E.N., Derevyanko V.A., Makuha A.V. *Proceedings of the Fourth Russian National Conference on Heat Transfer*, 2006, 7, p. 175–178.
- 8 Kusaiynov K., Shuyushbayeva N.N., Shaimerdenova K.M., Nurgalieva Zh.G., Omarov N.N. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, 88, 3, p. 676–680.

УДК 621.9.047.7-022.532

А.К.Зейниденов, Н.Х.Ибраев, Ж.М.Айтбаева

*Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова
(E-mail: niazibrayev@mail.ru)*

Разработка техники и методики получения наноструктурированного пористого оксида алюминия методом анодного окисления

В работе приведены результаты разработки и изготовления экспериментальной установки для получения двумерных наноструктур методом электрохимического анодирования. Пленки с высокоупорядоченной пористой структурой получены методом двухстадийного анодирования. С помощью растровой электронной микроскопии установлено, что диаметр пор составляет примерно 50 нм, а расстояние между соседними каналами — примерно 105 нм. Определено, что толщина пленок равна 55 мкм, а удельная площадь поверхности пористых пленок оксида алюминия, измеренная методом капиллярной конденсации азота, — 15.3 м²/г.

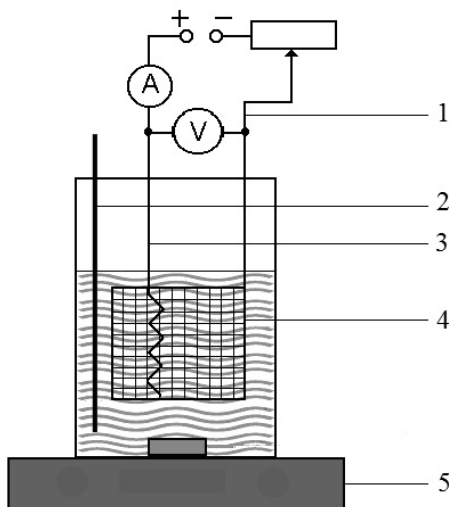
Ключевые слова: анодирование, электрохимическая полировка, пористый оксид алюминия, двухэлектродная электрохимическая ячейка.

В настоящее время активно развиваются методы создания наноструктурированных материалов, основанные на использовании процессов формирования и самоформирования. Одним из распространенных методов получения пористых оксидных пленок с контролируемой структурой является анодное окисление металлов [1–4]. При этом параметры синтезируемой пористой структуры можно варьировать в широких диапазонах (диаметр пор от 1 до 800 нм, расстояние между порами от 3 до 1000 нм, толщину пленки — до нескольких сотен микрон) путем использования различных условий анодирования (состав электролита, напряжение, температура и т.д.). Электрохимический подход позволяет не только производить пористые среды на поверхности материалов, но и может быть использован для заполнения образовавшихся пор требуемыми веществами с целью получения нанокompозитных материалов различного функционального назначения. Конструкция электрохимической ячейки определяет возможность контроля тех или иных параметров электрохимической обработки, а следовательно, играет важную роль при получении наноматериалов данным методом [5].

В настоящей работе приведены результаты исследования по получению пленок пористого оксида алюминия методом электрохимического анодирования. Для этой цели был разработан и сконструирован специальный экспериментальный комплекс, основой которого является электрохимическая ячейка вертикального типа.

Важной характеристикой металлического алюминия, влияющей на процесс упорядочения пористой структуры, является шероховатость его поверхности. На рисунке 1 показана схема установки для полировки поверхности алюминия. Выравнивание поверхности алюминия осуществлялось электрохимической полировкой в импульсном режиме. Использован электролит, который имеет следующий состав: CrO₃ (185 г/л) и H₃PO₄ (1480 г/л). Пластины алюминия погружали в подготовленный раствор при температуре электролита 80 °С и постоянном перемешивании. Для проведения электрохимического полирования были выбраны следующие параметры: напряжение — 20 В, ток — 11 А, длительность импульса — 3 сек, интервал между импульсами — 40 сек, количество импульсов — 40 шт. Время полирования поверхности алюминия продолжалось 40 мин. После проведения электрохимической полировки образцы тщательно промывались в дистиллированной воде и высушивались

на атмосферном воздухе. Контроль качества полировки оценивался по внешнему виду поверхности алюминия.



1 — источник постоянного тока; 2 — контактный термометр; 3 — анод;
4 — катод; 5 — магнитная мешалка с подогревом

Рисунок 1. Схема установки для электрохимической полировки поверхности алюминия

На рисунке 2 показаны СЭМ-изображения поверхности пленок алюминия до и после электрохимической полировки. При электрохимическом полировании в первую очередь растворяются наиболее высокие выступы шероховатостей, затем поверхность выравнивается и становится гладкой и блестящей. Замечено, что увеличение продолжительности электрополировки приводит к сглаживанию неровностей, но сопровождается значительным растворением алюминия и уменьшением толщины металлической пластины. Полученные результаты показали, что вид используемой полировки оказывает существенное влияние на качество поверхности.

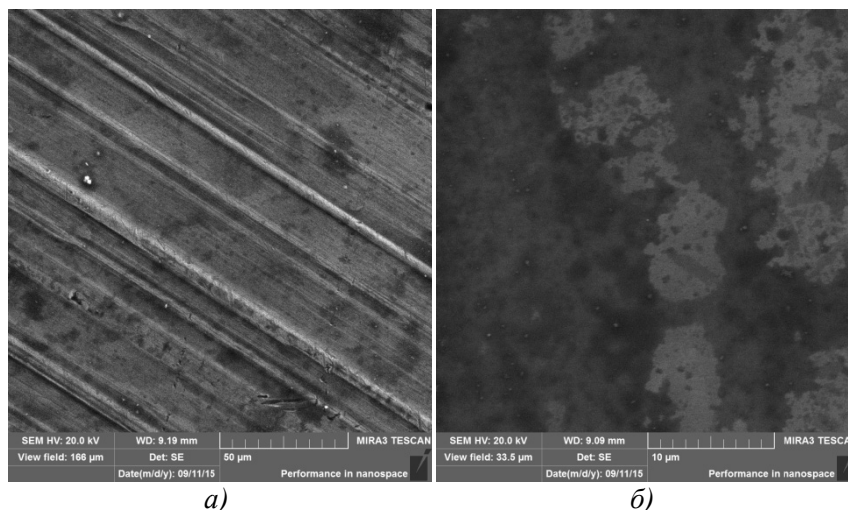
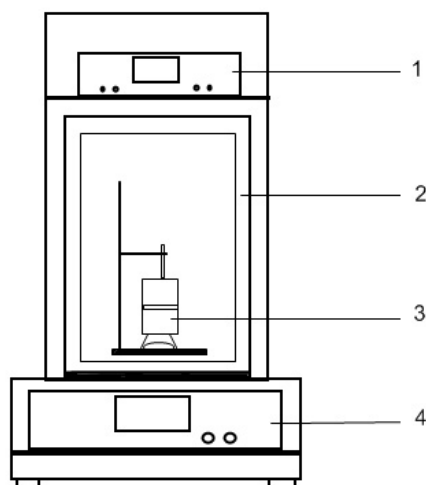


Рисунок 2. СЭМ-изображения поверхности пленок алюминия до (а) и после (б) электрохимической полировки

Синтез оксида алюминия осуществлялся при «мягких» условиях, включающих две стадии анодирования при напряжении $U = 40$ В в 0,3 М растворе щавелевой кислоты [5]. В качестве исходного материала были использованы алюминиевые пластины (степень чистоты 99,99%) толщиной 0,5 мм и размером 3,5×3,5 см. Для увеличения размера кристаллитов алюминия, снятия микронапряжений в образце и последующего достижения лучшей упорядоченности получаемых пор, подложки алюми-

ния отжигали в муфельной печи на воздухе в течение 10 часов при $T = 500$ °С. Для удаления поверхностных дефектов алюминия проводилась электрохимическая полировка в импульсном режиме в растворе CrO_3 и H_3PO_4 . После этого образцы промывали в дистиллированной воде и высушивали на воздухе. Электролит был получен на основе воды двойной фильтрации и деионизации на водоочистителе AquaMax 360 Basic. Удельное сопротивление воды составляло 18,2 МОм/см. Полученные матрицы оксида алюминия отделялись от непрореагировавшего алюминия селективным растворением последнего в растворе CuCl_2 в HCl . Анодирование пленок ПОА проводилось при низкой температуре.

Схема установки для получения наноструктурированного пористого оксида алюминия представлена на рисунке 3. Анодирование алюминия проводили в двухэлектродной электрохимической ячейке (3) с использованием источника постоянного тока MPS-7081 (4). Конструкция используемой ячейки изготовлена из фторопласта. Вспомогательным электродом служила платиновая пластина, а рабочим электродом — отполированная алюминиевая фольга. Анодирование алюминия производилось в холодильной камере (2) при температуре $+ 2$ °С. Токвые характеристики процесса анодирования алюминия измерялись амперметром UT 803 (1).



1 — амперметр; 2 — холодильная камера; 3 — двухэлектродная электрохимическая ячейка; 4 — источник тока

Рисунок 3. Установка для получения наноструктурированного пористого оксида металлов

Особенностью данной конструкции является плоскопараллельное взаиморасположение электродов в двухэлектродной электрохимической ячейке, что в результате обеспечивает однородное распределение линий напряженности электрического поля по площади образца. Это способствует повышению однородности геометрических параметров пористой структуры по всей анодируемой поверхности, а также улучшению воспроизводимости результатов анодирования.

На рисунке 4 представлены токвые характеристики при получении оксидных слоев в электролите на основе щавелевой кислоты. Как видно из представленных зависимостей, в момент включения напряжения сила тока в цепи имеет максимальное значение. Это обусловлено тем, что на поверхности алюминия еще нет пленки и, следовательно, сопротивление в цепи незначительно. Сразу после включения напряжения начинается рост барьерного анодного слоя, создающего значительное сопротивление, что приводит к падению плотности тока в первые секунды анодирования. С увеличением толщины барьерного слоя увеличивается температура электролита в приэлектродном слое, что способствует повышению растворимости анодной пленки. Это приводит к тому, что сформировавшийся барьерный слой начинает растворяться, в результате чего происходит уменьшение сопротивления и некоторое увеличение плотности тока. Переход от снижения плотности тока к увеличению характеризует начало образования пористого слоя анодной пленки. Расстояние между центрами пор пропорционально напряжению, при котором проводится окисление. Коэффициент пропорциональности лежит в интервале от 2,5 до 2,8 нм/В.

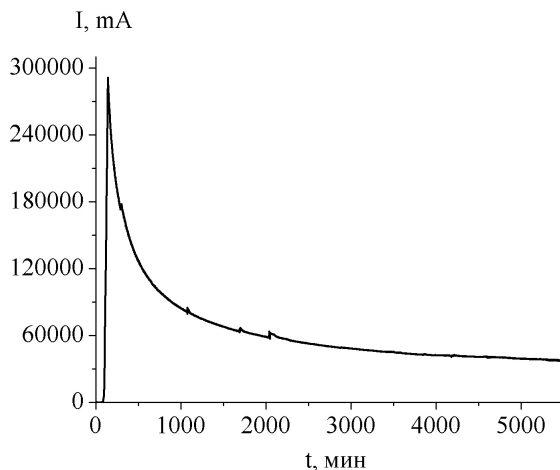
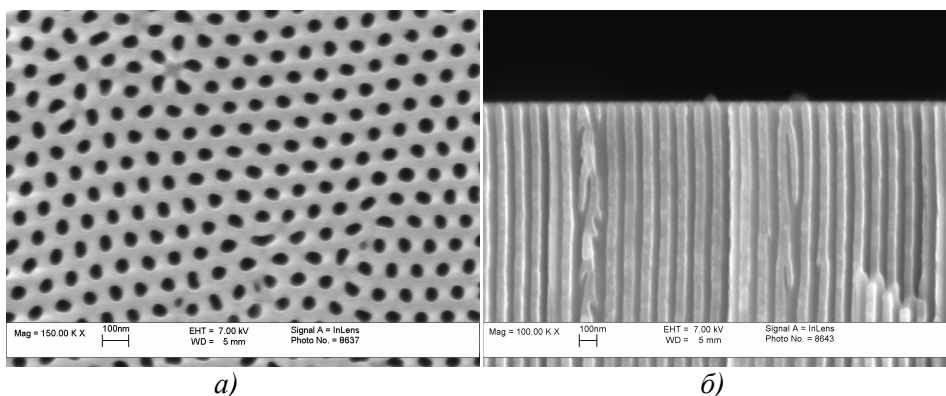


Рисунок 4. Токовые характеристики процесса анодирования алюминия в $(\text{COOH})_2$ кислоте

Морфология поверхности и поперечного скола образцов, полученных методом двухстадийного анодирования, показаны на рисунке 5. На поверхности пленки наблюдаются поры одинакового диаметра ~ 50 нм и с расстоянием между порами около 105 нм (рис. 5а). На поперечном сколе образца (рис. 5б) видны параллельные прямые каналы, расположенные перпендикулярно поверхности.



а) верхняя сторона оксидной пленки после удаления барьерного слоя; б) поперечный скол

Рисунок 5. СЭМ-изображения пленки анодного ПОА, полученной методом двухстадийного анодирования в 0,3 М растворе щавелевой кислоты при напряжении 40 В

Таким образом, разработанная экспериментальная установка позволяет получить матрицы оксида алюминия с высокоупорядоченной структурой и с заданными геометрическими размерами цилиндрических пор. Выявлено, что упорядоченность пористой структуры пленок анодного оксида алюминия зависит от условий анодирования. Установлено, что увеличение продолжительности электрохимической полировки исходных образцов алюминия приводит к сглаживанию неровностей, но сопровождается значительным растворением алюминия и уменьшением толщины металлической пластины.

Список литературы

- 1 *O'Sullivan J.P., Wood G.C.* The morphology and mechanism of formation of porous anodic films on aluminium // Proc. Roy. Soc. Lond. A. — 1970. — Vol. 317. — № 1531. — P. 511–543.
- 2 *Masuda H., Satoh M.* Fabrication of gold nanodot array using anodic porous alumina as an evaporation mask // Japanese Journal of Applied Physics. — 1996. — Vol. — P. L126–L129.
- 3 *Macak J.M., Tsuchiya H., Schmuki P.* High-Aspect-Ratio TiO_2 Nanotubes by Anodization of Titanium // Angew. Chem. Int. Ed. — 2005. — Vol. 44. — P. 2100–2102.

4 *Halimaoui A.* Porous silicon formation by anodization, in *Properties of Porous Silicon*. 1997, Canham L.T., Institution of Engineering and Technology. — London. — P. 12–22.

5 *Niensch K., Choi J., Schwirn K., Wehrspohn R.B., Gösele U.* Self-ordering regimes of porous alumina: The 10% porosity rule // *Nano Lett.* — 2002. — Vol. 2. — P. 677–680.

А.К.Зейниденов, Н.Х.Ибраев, Ж.М.Айтбаева

Анодтау әдісімен нанокұрылымдық кеуекті оксид алюминийді алуға арналған техникасын және әдісін әзірлеу

Жұмыс барысында электрохимиялық анодтау әдісімен екіөлшемді нанокұрылымдарды алу үшін тәжірибелік қондырғыны өңдеу мен даярлау нәтижелері келтірілген. Жоғары реттелген кеуекті құрылымы бар қабыршақ екі сатылы анодтау әдісі арқылы алынды. Растрлі электронды микроскоп көмегімен кеуек диаметрі — шамамен 50 нм, ал көршілес түтіктер аралығындағы қашықтық 105 нм құрайды. Қабыршақ қалыңдығы 55 мкм, ал азоттың капиллярлық конденсация әдісі арқылы өлшенген алюминий оксиді қабыршағының нақты бетінің ауданы — 15.3 м²/г.

A.K.Zeinidenov, N.Kh.Ibrayev, Zh.M.Aitbaeva

Development of techniques and methods producing nanostructures porous aluminum oxide by anodic oxidation

Results of the experimental design and manufacturing systems for of receipt the two-dimensional nanostructures by electrochemical anodization. The films with a highly-ordered porous structure are produced using the method of two-stage anodic oxidation. By means of raster electron microscopy it is found that the diameter of the pores amounts to nearly 50 nm and the separation between the adjacent channels is almost 105 nm. The thickness of the films is equal to 55 mm, and the specific surface area measured using the method of nitrogen capillary condensation is 15.3 m²/g.

Н.Х.Ибраев, Д.А.Афанасьев, Т.М.Сериков, Г.С.Аманжолова

*Институт молекулярной нанофотоники,
Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова
(E-mail: serikov-timur@mail.ru)*

Получение пленок титана методом магнетронного распыления для синтеза пористых пленок диоксида титана

В статье приведены результаты исследования микроструктуры пленок, полученных с помощью магнетронной распылительной системы (МРС), собранной на базе ВУП-4. Разработанная МРС позволяет получать пленки с высокой скоростью осаждения с минимальными видимыми дефектами в структуре. Контроль скорости распыления производился за счет изменения напряжения распыления, которое приводит к изменению тока, что увеличивает и/или понижает степень ионизации газа, и выбиванию атомов мишени. Установлено, что с увеличением напряжения от 300 до 600 В скорость роста пленок увеличивается от 2,4 до 4 ангстрем в секунду. Установлено, что при напряжении около 400 В гранулы, составляющие пленку, имеют более крупную структуру, чем в пленках, полученных при 500 и 600 В. Проведен элементный анализ пленок, полученных методом МРС.

Ключевые слова: титановые пленки, магнетронное распыление, диоксид титана, синтез, микроструктура.

Введение

Диоксид титана, благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, широко используется в молекулярной электронике [1], солнечной энергетике [2–5] и фотокатализе [6]. В последние годы для получения наноструктур на основе диоксида титана используют такие методы синтеза, как гидротермальный [7], золь-гель [8], химическое осаждение из паровой фазы [9], методы прямого окисления титана [10] и многие другие методы [11–13]. В зависимости от используемого метода синтеза можно получить наноструктуры диоксида титана различной морфологии, такие как наночастицы, нанотрубки, нанопровода и наностержни [4, 5, 7, 12, 13]. Существование различных методов синтеза наноструктур позволяет использовать их избирательно, в зависимости от необходимых свойств и области практического использования данного материала. Одной из наиболее важных областей практического использования является использование пористых пленок TiO_2 в качестве фотокатода сенсibilизированных красителем солнечных ячеек (СКСЯ). Для получения высокоэффективных СКСЯ используемые пленки TiO_2 должны обладать высокой удельной поверхностью и хорошими электротранспортными свойствами. Среди существующих наноструктур TiO_2 такими свойствами обладают пленки, образованные нанотрубками. Для нанотрубок TiO_2 наблюдается высокая удельная поверхность и одномерный транспорт электронов вдоль стенок [14, 15]. Одномерный транспорт приводит к уменьшению времени переноса электронов от центров генерации заряда к электроду.

Нанотрубки диоксида титана можно получить методом двухстадийного анодирования металлического титана во фторосодержащем электролите [16]. Однако дальнейшее использование пленок, образованных нанотрубками TiO_2 , затруднено в связи с необходимостью получения их на прозрачных стеклах с проводящим слоем ИТО (оксиды олова и индия) или FTO (фторированный оксид олова). Этого можно добиться двумя путями:

1) получить методом электрохимического анодирования титановой фольги пористую пленку с нанотрубками диоксида титана. Химическим или другим методом отделить пленку TiO_2 . Затем химически привить пленку на поверхность стекла с проводящим слоем ИТО или FTO [17];

2) альтернативным методом является получение металлического титана на поверхности стекла с проводящим слоем ИТО или FTO. Затем путем электрохимического анодирования синтезируется пористая пленка TiO_2 . В случае использования данного метода принципиальным является получение однородных пленок титана заданной толщины.

Существенным недостатком первого метода является сложность процессов отделения пористой пленки TiO_2 от титановой фольги и химического прививания к подложке с проводящим слоем FTO. Данные процессы усложняются из-за механической хрупкости пленки TiO_2 .

Использование второго метода является более привлекательным. Сложность данного метода заключается в необходимости получения пленки металлического титана на поверхности стеклянной подложки с проводящим слоем. Полученные пленки, в первую очередь, должны обладать высокой чистотой и однородностью.

На сегодняшний день для получения пленок металлов используют различные физические и химические методы, такие как термическое испарение, молекулярно-лучевая эпитаксия, электронно-лучевое испарение, магнетронное распыление, лазерная абляция и т.д. [18–22]. Анализ существующих методов показал, что для получения пленок титана заданной толщины может быть использован метод магнетронного распыления [23]. Повторяемость результатов при соблюдении технических условий распыления также является преимуществом метода магнетронного распыления.

Целью настоящей работы является изготовление однородных пленок титана заданной толщины на подложках с проводящим покрытием FTO для получения из них пористых пленок TiO_2 .

Эксперимент

Для достижения поставленной цели была реализована магнетронная распылительная система (MPC) на базе вакуумного универсального поста ВУП-4. ВУП-4 предназначен для препарирования объектов в вакууме до 10^{-5} мм рт.ст. Полученные при высоком вакууме пленки имеют высокую степень чистоты.

Магнетронная распылительная система, собранная на базе вакуумного универсального поста приведена на рисунке 1.

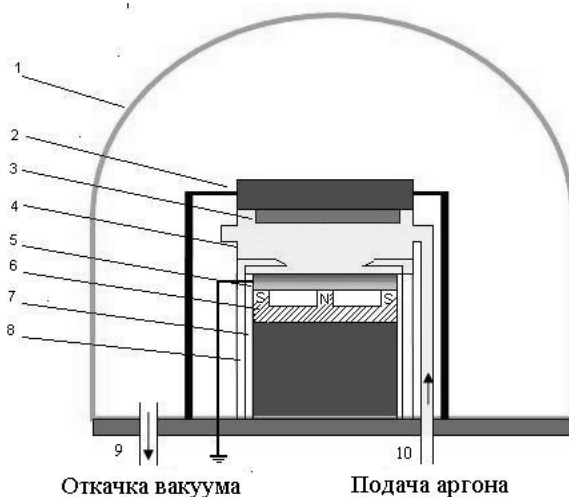


Рисунок 1. Внешний вид магнетронного распылителя, собранного на базе ВУП-4

Основными элементами электрической цепи магнетронной распылительной системы является плоский катод, изготовленный из титана, и анод, устанавливаемый по периметру катода. Магнитная система собрана на основе постоянного магнита. Вся система магнетронного распыления установлена внутри камеры на широкий алюминиевый цилиндр диаметром 25 см и высотой 8 см, который используется для отвода тепла. Принцип работы магнетронных распылительных систем подробно описан в работе [22]. Он основан на торможении электронов в скрещенных электрических и магнитных полях. Как только на анод и катод подается напряжение с известной частотой, между ними возникает неоднородное электрическое поле и появляется тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Одним из преимуществ метода является то, что большая часть энергии электрона используется для ионизации и возбуждения атомов аргона. Это значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и концентрацию положительных ионов у поверхности мишени. Данное обстоятельство приводит к повышению интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительному росту скорости осаждения покрытия.

Схема магнетронного распылителя приведена на рисунке 2. Данная магнетронная система оснащена источником электропитания для MPC серии APEL-M-5DC-1000-2 (Россия) с возможностью

работы в импульсном режиме до 100 кГц. Максимальная выходная мощность 5 кВт. Амплитуда поджигающего импульса 1000 В. Отличительной чертой разработанной МРС является контроль толщины напыляемых пленок в процессе распыления с помощью массочувствительного кварцевого резонатора. При сборке системы измерения толщины использовался кварцевый резонатор типа HCMOS/TTL в корпусе HO-21C с частотой 10 МГц. Перед началом процесса распыления кварцевый резонатор подключался к частотомеру. В процессе распыления через одинаковый интервал производилась запись частоты. Измеренная разность частоты позволяет определить не только толщину пленки, но и скорость ее нанесения [23], что дает возможность получить пленку заданных размеров и при необходимости изменить условия напыления.



- 1 — колпак вакуумной установки; 2 — держатель подложки; 3 — подложка, на которую осаждается пленка; 4 — стеклянная камера с отверстиями для подачи аргона, поддержания необходимого давления и распределения аргона в объеме поджига магнетронного разряда; 5 — мишень (катод); 6 — постоянный магнит; 7 — изолятор; 8 — анод; 9 — откачка вакуума; 10 — подача аргона в камеру

Рисунок 2. Схема магнетронного распылителя

Для получения пленок титана в качестве подложки использовались стекла с проводящим слоем. Диаметр распыляемой мишени составлял 100 мм, толщина — не более 0,5 см. Расстояние от мишени до подложки составляет 4 см. Мишень изготовлена из технического титана марки ВТ-1,0 (ГОСТ 19807-91). Получение высокого вакуума на ВУП-4 проводится в соответствии с инструкцией (Поствакуумный универсальный ВУП-4. Техническое описание и инструкция по эксплуатации). При достижении необходимого вакуума (10^{-4} мм.рт.ст.) производится напуск рабочего газа до 10^{-2} мм.рт.ст. (аргон 99,8 %, ГОСТ 10157-79.) В камеру из установленного рядом баллона с редуктором подавалось напряжение поджига на магнетрон порядка 1 кВ. При подаче напряжения поджига на магнетрон ток отсутствует до тех пор, пока не подан аргон в необходимой концентрации. Напуск аргона производится через тонкий натекагель, который входит в стандартную комплектацию ВУП-4. Напряжение на катоде варьировалось от 100 до 600 В в импульсном режиме, частота импульсов 100 кГц, ток разряда менялся в диапазоне от 0,10 до 0,2 А. Длительность напыления для каждого образца составляла 10 мин. Исследование микроструктуры и поперечного скола образцов пленок титана осуществлялось с помощью электронного растрового микроскопа Mira 3LMU (Tescan, Чехия). Скорость распыления определяли по показаниям кварцевого резонатора.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены данные о толщине и скорости напыления пленок титана. Толщина пленок и микроструктура исследовались с помощью электронного растрового микроскопа Mira 3LMU (Tescan, Чехия).

Толщина и скорость напыления при различных напряжениях распыления

№	Напряжение, В	Ток, А	Частота импульсов, кГц	Толщина пленки, нм	Скорость напыления, Å/сек
1	100	≈ 0,10	100	0	0
2	200	≈ 0,12	100	0	0
3	300	≈ 0,14	100	146	2,4
4	400	≈ 0,15	100	174	2,9
5	500	≈ 0,17	100	212	3,5
6	600	≈ 0,20	100	242	4

Как видно из таблицы 1, при низком напряжении процесса распыления не происходит, так как не хватает энергии для ионизации газа и выбивания атомов с мишени. При напряжении 100 В отсутствует электрический разряд. После достижения напряжения 300 В между мишенью и подложкой появляется тлеющий разряд. При распылении при этом напряжении на подложке образуется пленка, толщина которой составляет 146 нм. Была определена величина скорости напыления. В рассматриваемом случае скорость напыления составила 2,4 ангстрема в секунду. При увеличении напряжения распыления скорость роста пленок увеличивается. Использование кварцевого резонатора показало, что процесс напыления происходит равномерно.

В таблице 2 приведены результаты исследования морфологии поверхности пленок, распыленных при разных напряжениях. Из представленных данных видно, что при напряжении 300 В образуется пленка с гранулированной микроструктурой. Размер гранул достигает 2,5–3,5 мкм. Поперечный скол пленки также показывает неоднородность получаемой пленки (табл. 2). С ростом температуры происходит уменьшение размеров гранул в напыленной пленке титана. Начиная с напряжения 400 В пленка имеет однородную микроструктуру с размером гранул менее 300 нм. Наиболее однородной микроструктурой обладает пленка, полученная при напряжении 600 В. Размер гранул для данной пленки минимален по сравнению с пленками, полученными при других рабочих напряжениях.

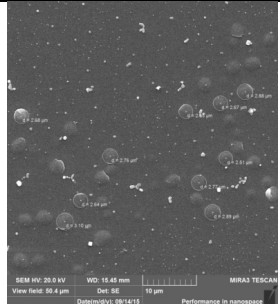
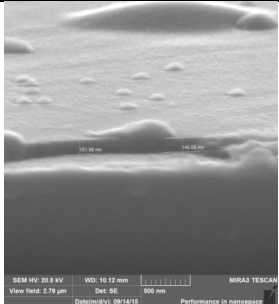
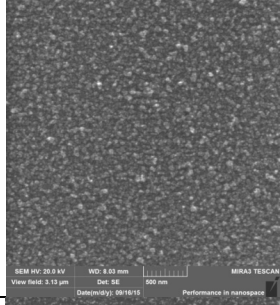
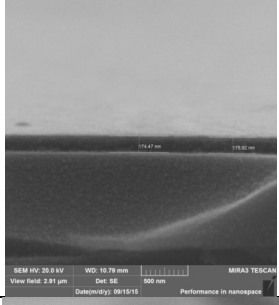
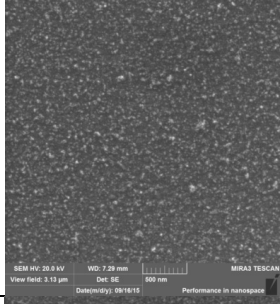
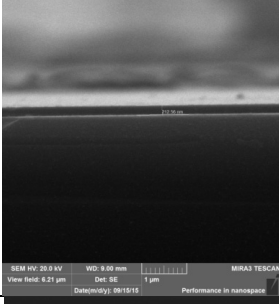
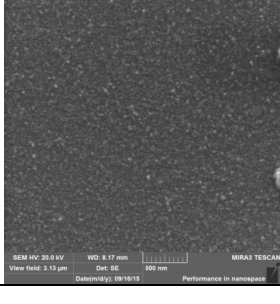
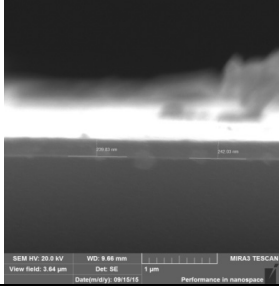
Таким образом, в результате варьирования напряжения распыления были получены пленки титана с различной скоростью напыления и различными размерами гранул. Оптимальным является использование напряжения величиной 600 В. Напряжение выше 600 В приводит к резкому росту температуры в рабочем объеме, и поэтому такие напряжения не использовались для работы.

Для напыленных пленок был проведен элементный анализ с помощью энергодисперсионного анализатора INCAPentaFET-x3 (Oxford Instruments, Англия). Энергодисперсионный анализ пленки, полученный при режиме магнетронного распыления — напряжение от 300 до 600 В, частота импульсов 100 кГц, время распыления — по 10 минут, показал идентичный результат, который приведен на рисунке 3. Была построена многослойная карта и произведено распределение элементов на поверхности пленки (рис. 4). Из представленных данных видно, что на поверхности пленки присутствуют титан, углерод, натрий, магний, кремний, кислород и кальций. Наличие последних обусловлено тем, что в качестве подложки было использовано стекло.

На рисунке 5 приведен результат энергодисперсионного анализа пленки, полученной при магнетронном распылении.

В составе пленки присутствуют титан Ti, а также C, Na, Ca, Si, O, Mg, которые относятся к элементам использованной подложки — стекла (оксид кремния, натрий, кальций). Наличие алюминия Al в составе пленки титана объясняется тем, что при распылении мишени использовался технический титан марки ВТ-1,0, в котором может присутствовать Al в количестве до 0,5 %.

Морфология поверхности и поперечный скол пленок титана, полученных магнетронным распылением

Напряжение, В	Поверхность образцов	Поперечный скол
300		
400		
500		
600		

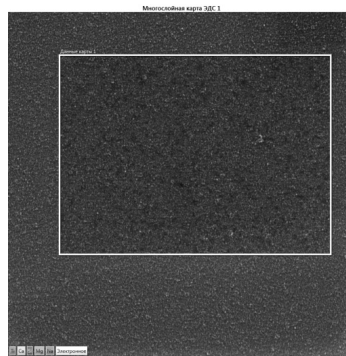


Рисунок 3. Многослойная карта поверхности пленки титана

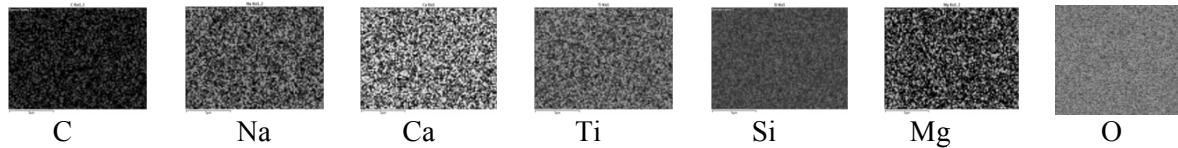


Рисунок 4. Распределение элементов на поверхности пленок

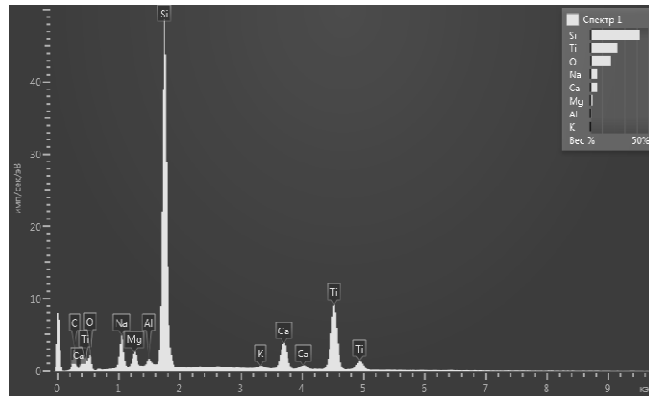


Рисунок 5. Энергодисперсионный анализ пленки титана, полученной методом магнетронного распыления

Для получения нанотрубок диоксида титана пленки титана подвергались электрохимическому анодированию. Использовался электролит с низкой концентрацией NH_4F – 0,2 % мас. и H_2O – 2 % мас. в этиленгликоле. Кроме того, при анодировании использовалось более низкое напряжение, так как при напряжениях выше 20 В наблюдается либо частичное, либо полное отслаивание пленки титана от поверхности стекла.

Сравнение результатов, приведенных на рисунке 6 и в таблице 2 (600 В), показывает, что анодирование приводит к изменению морфологии поверхности пленки. Происходит формирование пористой структуры пленки TiO_2 . Анодирование в течение 20 минут и при напряжении 20 В приводит к полному окислению титановой пленки и образованию пористой структуры TiO_2 . Однако нанотрубки здесь имеют более искаженную структуру, чем при анодировании титановой фольги. Возможно, это связано с тем, что при магнетронном распылении титана пленка имеет гранулированную структуру. Поверхность нанотрубок диоксида титана, полученных при анодировании пленки, осажденных методом МРС, сильно загрязнена побочными продуктами, устранение которых возможно при ультразвуковой обработке в органическом растворителе.

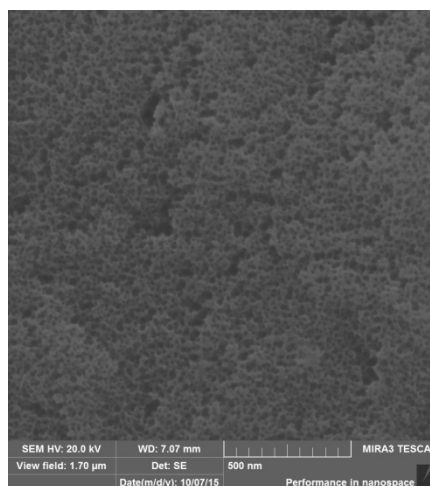


Рисунок 6. СЭМ-изображения нанотрубок диоксида титана, полученных на стеклянных подложках с проводящим слоем FTO

По результатам работы была разработана и создана установка для получения пленок металлов методом магнетронного распыления. Преимуществом разработанной установки является возможность контроля толщины пленок в процессе распыления. Система измерения толщины пленки в процессе ее напыления реализована на основе массочувствительного кварцевого резонатора. Она позволяет измерять толщину пленки в диапазоне от 1 нм до единиц микрометров. Установка позволяет получать тонкие пленки металлов с различной скоростью нанесения металла на поверхность подложки. Скорость нанесения определяется рабочим напряжением. Установлено, что с увеличением напряжения от 300 до 600 В скорость роста пленок увеличивается от 2,4 ангстрема до 4 ангстрем в секунду. При использовании разработанной установки были получены пленки титана с различными структурой и скоростью напыления. Исследована морфология поверхности пленок. Выявлено, что при напряжении около 300 В пленка имеет ярко выраженную гранулированную структуру. При напряжениях выше 400 В образуется однородная бездефектная пленка титана.

Список литературы

- 1 Yuxin T., Yanyan Zh., Jiyang D. Mechanical Force-Driven Growth of Elongated Bending TiO₂-based Nanotubular Materials for Ultrafast Rechargeable Lithium Ion Batteries // *Advanced materials*. — 2014. — Vol. 26. — № 35. — P. 6111–6118.
- 2 Hui W., Li L., Chen C. Anodic TiO₂ Nanotube Arrays for Dye-Sensitized Solar Cells Characterized by Electrochemical Impedance Spectroscopy // *Ceramics International*. — 2012. — Vol. 38. — № 8. — P. 6253–6266.
- 3 Chang H., Chen C., Kao M., Chien S. Photoelectrode thin film of dye-sensitized solar cell fabricated by anodizing method and spin coating and electrochemical impedance properties of DSSC // *Applied Surface Science*. — 2013. — Vol. 275. — P. 252–257.
- 4 Xi M., Zhang Y., Long L., Li X. Controllable hydrothermal synthesis of rutile TiO₂ hollow nanorod arrays on TiCl₄ pretreated Ti foil for DSSC application // *Journal of Solid State Chemistry*. — 2014. — Vol. 219. — P. 118–126.
- 5 Li S., Liu Y., Zhang G., Zhao X., Yin J. The role of the TiO₂ nanotube array morphologies in the dye-sensitized solar cells // *Thin Solid Films*. — 2011. — Vol. 520. — № 2. — P. 689–693.
- 6 Kandiel T., Robben L., Alkaimad A., Bahnemann D. Brookite versus anatase TiO₂ photocatalysts: phase transformations and photocatalytic activities // *Photochemical and Photobiological Sciences*. — 2013. — Vol. 12. — № 4. — P. 602–609.
- 7 Yang J., Mei S., Ferreira J.M.F. Hydrothermal synthesis of TiO₂ nanopowders from tetraalkylammonium hydroxide peptized sols // *Materials Science and Engineering: C*. — 2001. — Vol. 15. — № 1. — P. 183–185.
- 8 Sahni S., Bhaskar Reddy S., Murty B.S. Influence of process parameters on the synthesis of nano-titania by sol-gel route *Materials Science and Engineering A*. — 2007. — Vol. 452. — P. 758–762.
- 9 Nam S.H., Hyun J.-S., Boo J.-H. Synthesis of TiO₂ thin films using single molecular precursors by MOCVD method for dye-sensitized solar cells application and study on film growth mechanism // *Materials Research Bulletin*. — 2012. — Vol. 47. — № 10. — P. 2717–2721.
- 10 Pierson H.O. *Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD): Principles, Technology and Applications*. — New Jersey, 1992. — P. 235.
- 11 Yan X.-M., Kang J., Gao L., Xiong L., Mei P. Solvothermal synthesis of carbon coated N-doped TiO₂ nanostructures with enhanced visible light catalytic activity // *Applied Surface Science*. — 2013. — Vol. 265. — P. 778–783.
- 12 Zhu Y., Li H., Koltypin Y., Hacohen Y.R., Gedanken A. Sonochemical synthesis of titania whiskers and nanotubes // *Chemical Communications*. — 2001. — Vol. 24. — P. 2616–2617.
- 13 Wu X., Jiang Q.Z., Ma Z.F., Fu M., Shangguan W.F. Synthesis of titania nanotubes by microwave irradiation // *Solid State Communications*. — 2005. — Vol. 136. — № 9. — P. 513–517.
- 14 Pugazhentirana N., Murugesana S., Anandan S. *Journal of Hazardous Materials*. — 2013. — Vol. 263. — P. 541–549.
- 15 Wu H., Li L., Chen C., Diao E. Anodic TiO₂ Nanotube Arrays for Dye-Sensitized Solar Cells Characterized by Electrochemical Impedance // *Spectroscopy Ceramics International*. — 2012. — Vol. 38. — P. 6253–6266.
- 16 Сериков Т.М., Ибраев Н.Х., Ильина Л.Ф., Смагулов Ж.Х. Влияние условий синтеза на поверхностные свойства пленок, образованных нанотрубками // *Коллоиды и поверхности – 2015: Тезисы докл. IV Междунар. науч. конф.* — Алматы: Изд-во «Арда», 2015. — С. 73.
- 17 Liua G., Hoivika N., Wangb X., Lub S., Wanga K., Jakobsena H. Photoconductive, free-standing crystallized TiO₂ nanotube membranes // *Electrochimica Acta*. — 2013. — Vol. 93. — P. 80–86.
- 18 Панфилов Ю. Нанесение тонких пленок в вакууме // *Технологии в электронной промышленности*. — 2007. — № 3. — С. 76–80.
- 19 Григорьев Ф.И. Плазмохимическое и ионно-химическое травление в технологии микроэлектроники. — М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики. — 2003. — С. 133.
- 20 Кузано Д.А. Исследование тонких пленок и электрооптические эффекты // *Физика и химия соединений* / Под ред. С.А. Медведева. — М.: Мир, 1970. — С. 537–578.
- 21 Болгова Т.Г. Получение и свойства тонких пленок сульфида кадмия, легированных щелочными металлами и галогенами (Cl, Br). — Воронеж, 2009. — С. 126.
- 22 Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г. Ионно-лучевые методы получения тонких пленок. — Казань, 2010. — С. 87.
- 23 Ежовский Ю.К. Поверхностные наноструктуры – перспективы синтеза и использования // *Соровский образовательный журнал*. — 2000. — Vol. 6. — № 1. — С. 56–63.

24 Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. — М.: Радио и связь, 1982. — 326 с.

25 Кельнер Р. Аналитическая химия. Проблемы и подходы. — М.: Мир, 2004. — 607 с.

Н.Х.Ибраев, Д.А.Афанасьев, Т.М.Сериков, Г.С.Аманжолова

Кеуекті титан диоксидін синтездеу үшін магнетронды тозандандыру әдісімен титан қабыршақтарын алу

Мақалада ВУП-4 базасында құрастырылған магнетронды тозандандыру жүйесінің (МТЖ) көмегімен алынған қабыршақтардың микроқұрылымын зерттеу кезіндегі нәтижелер берілген. Жобаланған МТЖ қабыршақтардың құрылымында айтарлықтай көзге көрінетін ақаулар байқалмайтын және өте жоғары жылдамдықта тұндыруға мүмкіндік береді. Қабыршақтарды тұндыру жылдамдығы тозандандыру кернеуін өзгерту арқылы реттелді. Кернеу шамасы 300 ден 600 В дейін жоғарылатқанда қабыршақтарды тұндыру жылдамдығы 2,4 А/с-тан 4 А/сек дейін жоғарлайтыны анықталды. Кернеудің шамасы 300 В кезінде қабыршақтарды құрайтын түйіршектердің көлемі шамамен 2,5–3,5 мкм тең. Тозандандыру кезінде кернеудің шамасы 400–600 В кезінде алынған қабыршақтардың құрылымы біркелкі және ақаусыз екені анықталды. МТЖ әдісімен алынған қабыршақтардың элементтік талдауы жүргізілді. Магнетронды тозандандыру кезінде алынған қабыршақтарды анодтаудан кейін алынған кеуекті қабыршақтардың қалыптасуы келтірілген.

N.Kh.Ibrayev, D.A.Afanasyev, T.M.Serikov, G.S.Amanzholova

Fabrication of titanium films by magnetron sputtering for synthesizing porous films titanium dioxide

In this paper presents the results of a microstructure study of the films obtained by magnetron sputtering system (MSS). This system collected on the basis of VUP-4. The developed MSS produces films with high deposition rate with a minimum of visible defects in the structure. Spray rate control performed by changing the sputtering voltage, which leads to a change in current, which increases and/or reduces the degree of ionization of the gas and dislodge target atoms. It is found that with increasing voltage of 300 to 600 V in the film growth rate increased from 2.4 to 4 angstroms per second. It was found that the stress of about 400 V in the granule was the film have a larger structure than the films obtained at 500 V and 600 V. An elemental analysis of the films produced by the energy dispersive analysis.

References

- 1 Yuxin T., Yanyan Zh., Jiyang D. *Advanced materials*, 2014, 26, 35, p. 6111–6118.
- 2 Hui W., Li L., Chen C. *Ceramics International*, 2012, 38, 8, p. 6253–6266.
- 3 Chang H., Chen C., Kao M., Chien S. *Applied Surface Science*, 2013, 275, p. 252–257.
- 4 Xi M., Zhang Y., Long L., Li X. *Journal of Solid State Chemistry*, 2014, 219, p. 118–126.
- 5 Li S., Liu Y., Zhang G., Zhao X., Yin J. *Thin Solid Films*, 2011, 520, 2, p. 689–693.
- 6 Kandiel T., Robben L., Alkaimad A., Bahnemann D. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2013, 12, 4, p. 602–609.
- 7 Yang J., Mei S., Ferreira J.M.F. *Materials Science and Engineering: C*, 2001, 15, 1, p. 183–185.
- 8 Sahni S., Bhaskar Reddy S., Murty B.S. *Influence of process parameters on the synthesis of nano-titania by sol-gel route Materials Science and Engineering A*, 2007, 452, p. 758–762.
- 9 Nam S.H., Hyun J.-S., Boo J.-H. *Materials Research Bulletin*, 2012, 47, 10, p. 2717–2721.
- 10 Pierson H.O. *Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD): Principles, Technology and Applications*, New Jersey, 1992, p. 235.
- 11 Yan X.-M., Kang J., Gao L., Xiong L., Mei P. *Applied Surface Science*, 2013, 265, p. 778–783.
- 12 Zhu Y., Li H., Kolytypin Y., Hacohen Y.R., Gedanken A. *Chemical Communications*, 2001, 24, p. 2616–2617.
- 13 Wu X., Jiang Q.Z., Ma Z.F., Fu M., Shanguan W.F. *Solid State Communications*, 2005, 136, 9, p. 513–517.
- 14 Pugazhenthirana N., Murugesana S., Anandan S. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 263, p. 541–549.
- 15 Wu H., Li L., Chen C., Diao E. *Spectroscopy Ceramics International*, 2012, 38, p. 6253–6266.
- 16 Serikov T.M., Ibrayev N.H., Ilyna L.F., Smagulov Zh.Kh. *Colloids and Surfaces 2015: Abstracts of the IV International Conf.*, Almaty: Arda, 2015, p. 73.
- 17 Liua G., Hoivika N., Wangb X., Lub S., Wanga K., Jakobsena H. *Electrochimica Acta*, 2013, 93, p. 80–86.

- 18 Panfilov Yu. *Technology in the electronics industry*, 2007, 3, 76–80 p.
- 19 Grigoriev F.I. *Plasma-chemical and ion-chemical etching in the microelectronics technology*, Moscow: Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, 2003, p. 133.
- 20 Cusano D.A. *Physics and Chemistry of compounds*, edit. S.A. Medvedev, Moscow: Mir, 1970, p. 537–578.
- 21 Bolgova T.G. *Preparation and properties of thin films of cadmium sulfide doped with alkali metals and halogens (Cl, Br)*, Voronezh, 2009, p. 126.
- 22 Petukhov V.Yu., Gumarov G.G. *Ion-beam methods of producing thin films*, Kazan, 2010, p. 87.
- 23 Yezhovskiy Yu.K. *Sorov. educational journal*, 2000, 6, 1, p. 56–63.
- 24 Danilin B.S., Syrchin V.K. *Magnetron sputtering systems*, Moscow: Radio and Communication, 1982, 326 p.
- 25 Kelner R. *Analytical chemistry. Problems and approaches*, Moscow: Mir, 2004, 607 p.

ӨОЖ 004.942

А.А.Айкеева¹, Б.А.Жәутіков², К.С.Роговая¹, Ф.Б.Жәутіков¹, П.А.Мухтарова¹

¹Е.А.Бөкетов атындағы Қарағанды мемлекеттік университеті;

²Х.Досмухамедов атындағы Атырау мемлекеттік университеті

(E-mail: ksusharogovaya@mail.ru)

Электромагниттік көтергіш қондырғысының «скип–бағыттаушы құрылғы» жүйесін зерттеу

Мақала электромагниттік көтергіш қондырғы жүйесінің элементтерін модельдеуге арналған. Электромагниттік көтергіш қондырғының жұмыс істеу принциптері көрсетілген, сонымен бірге «скип–электромагнит» жүйесінің имитациялық 3-D модельдеуі жасалған. Тұрақты магниттер және электромагниттер скипте және бағыттаушы құрылғыларда орналасқан. Модельдеу элементтері әр кезеңде суреттермен бейнеленеді. 3-D модельдеу нәтижесінде жұмыста өзекшенің үш элементіне талдау жасалып, олардың салыстырма диаграммасы құрастырылған.

Кілт сөздер: электромагниттік көтергіш қондырғы, скип, 3-D модельдеу, ANSYS бағдарламасы, тарту күші.

Конструкцияларды есептеу мен жобалаудың компьютерлік жабдықтарының дамуы радиоэлектроника, машина жасау, автомобиль жасау, тау-кен өндіру және өндірістің т.б. әр түрлі салаларында кәдімгі құралы болған модельдерді жасау мүмкіндігін туғызды. Компьютерлік модельдердің қонымдылығы зерттелетін объект түпнұсқасының (немесе толық объектілер кластарының) қасиеттерін анықтайтын негізгі факторларын анықтауға, атап айтқанда, модельденетін физикалық жүйесінің оның параметрлері мен бастапқы жағдайлары өзгерісіне әсерін зерттеуге мүмкіндік береді [1].

Берілген жұмыста бірқатар бағдарламаларды зерттеу нәтижесінде версиясы 14.0 болатын ANSYS бағдарламасы таңдап алынды. Берілген бағдарлама CAD/CAM/CAE жүйелердің класына жататын заманауи аяқталған элементті бағдарламалық өнім болып табылады. Жүйенің модельденуі ANSYS Multiphysics бөлімінде жүргізіледі.

Қазіргі заманғы ақпараттық әдістер жүйелік талдауға негізделіп, жоғарыда аталған машиналарды модельдеудің негізіндегі эксплуатациялау және жасау технологиясының ерекшеліктерін, олардың электромагниттік өрістің сызықтық емес теориясының әдістері арқылы жүзеге асырылуын ескереді. Бұдан басқа әр түрлі бұйымдар мен конструкциялардың қазіргі заманғы теориялық есептеу мен жобалау әдістері соңғы элементтер әдісін белсенді түрде қолдануын қарастырады. Айтылып отырған соңғы элементтер әдісінің шоғырландырылған түрі ANSYS қолданбалы бағдарламалар пакеті болып табылады. Бұл көзқарас тұрғыдан ANSYS қолданбалы бағдарламалар пакеті теориялық та, аналитикалық та зерттеулер кезінде қолданылу мүмкін [2].

Жүйе элементтерін автоматтандыру мақсатында келесі мәселелерді шешу қажет:

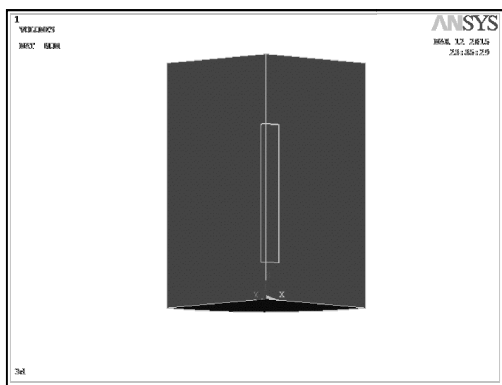
- құрылымдық-технологиялық факторларды ескере отырып, электромагниттік көтергіш қондырғысының электромагниттерін модельдеу мен есептеудің әдістерін жасау;
- электромагниттердің беріктігін, сенімділігі мен төзімділігін қамтамасыз ету үшін автоматтандырылған талдау жүйесін жасау;
- барлық қажет параметрлерді есептей отырып, элементтердің автоматты түрде ауысып қосылуына қол жеткізу.

Автоматтандырылған жүйелік талдаудың негізінде құрылымдық-технологиялық факторларды комплексті түрде ескеретін қондырғының электромагниттерінің модельдері жасалды.

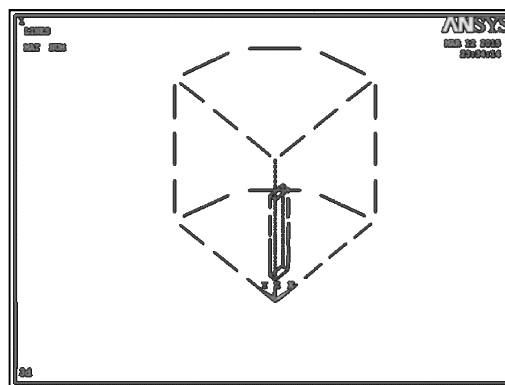
Модельдеудің алдында өзара әсерлесуші элементтерді таңдау сұрағы қойылды. Жоспар бойынша «скип» бетінде тұрақты магниттер немесе электромагниттер орналасып, ал электромагнитті көтергіш қондырғының бағыттаушы құрылғыларында берілген параметрлер бойынша автоматты ауысып қосылатын электромагниттер орналасу қажет. Бастапқыда соленоид немесе электромагнит біреуін таңдау қажет болды. Нәтижесінде әсерлесу элементі ретінде соленоидты қолданған кезде жүріп қозғалу жылдам және күрт болғандықтан, әсерлесу элементі ретінде электромагнит таңдап алынды.

Скип пен электромагнитті көтергіш қондырғысының бағыттаушы қондырғыларының электромагниттерінің негізгі элементтерінің әсерлесудің динамикалық процестерінің имитациялық модельдеудің мақсаты қымбат тәжірибелерді өткізбей-ақ есептеулер жүргізу арқылы жүйенің оңтайлы және тиімді параметрлерін анықтау болып табылады. Қазіргі заманғы компьютерлер мен қолданбалы бағдарламалар пакеттерінің мүмкіндіктері ортақ динамикалық «скип–электромагнит» жүйесінің органикалық өзара байланысқан буындарының көпфакторлы динамикалық күйлерін сипаттау үшін қажет жүйелік амалын жеткілікті толық жүзеге асыруға мүмкіндік береді [3].

Имитациялық модельдеу 3D-модельдеу форматында жүргізілді және 3D-модельдеудің ось бойынша симметриялығын ескере отырып, есептеу бірінші квадрант түрінде көрсетілген электромагниттердің көлденең қимасының төрттен бір бөлігі үшін жүргізілді. 1-суретте көрсетілген жұмыс жазықтығында ауа кеңістігімен қоршалған металл құрыш өзегі көрсетілген. Құрыш өзегі тұтас бір объект ретінде қарастырылады — өзектің берілген параметрлері бойынша тұрғызылған және өзек пен орам арасындағы ауа қабаты облысынан құрастырылған параллелепипед. Құрастыру кезінде екі параллелепипед (өзек пен ауа қабаты облысы) бір-бірімен қабаттасып, ортақ элементке біріктіріледі. Объектіні қоршайтын ауа қабаты құрыш өзегі мен ауа қабаты облысын қамтып цилиндрдің төрттен бір бөлігі түрінде көрсетілген. Ауа үшін магнит өтімділігінің параметрлері беріледі, ал өзек үшін магнит индукция B векторы мен магнит өрісінің H кернеулігінің параметрлері беріледі. Өзектің көлденең қимасының ауданын бөлу үшін SOLID 96 элементі [3] қолданылады. Берілген элемент тек қана 3D-модельдері үшін қолданылады. ANSYS бағдарламалық ортада жүргізілген модельдеудің кезеңдері 1-суретке сай жүргізілді.



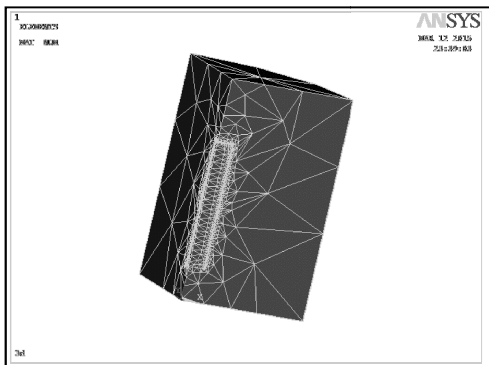
а) облыстарды құру



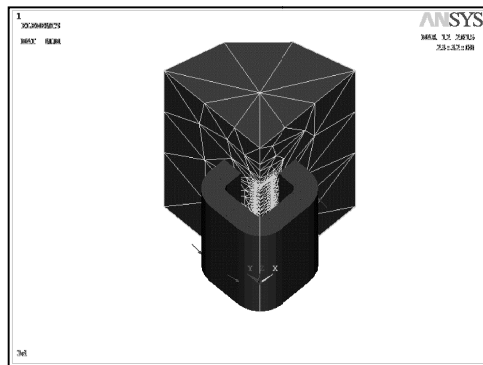
б) шекаралық сызықтарды орнату

1-сурет. Электромагниттің имитациялық 3-D модельдеудің кезеңдері

Электромагниттердің көлденең қимасының төрттен бір бөлігінің имитациясын жүзеге асыратын облыстарды құру үшін үш төбесінің координаталары бойынша параллелепипед бейнеленеді. Сыртқы ортаның (ауа) имитациясын көрсететін облыстар цилиндрдің сегменттері болып табылады. Келесі кезеңде модельдің облыстарын соңғы элементтерге бөлу жүргізіледі. Мұнда бөлу кезінде неғұрлым көп элементтер пайда болса, соғұрлым есептің шешу дәлдігі жоғары болады. Облыстардың соңғы элементтерге бөлінуі 2-суретте көрсетілген.



2-сурет. Бөлу облыстарын анықтау



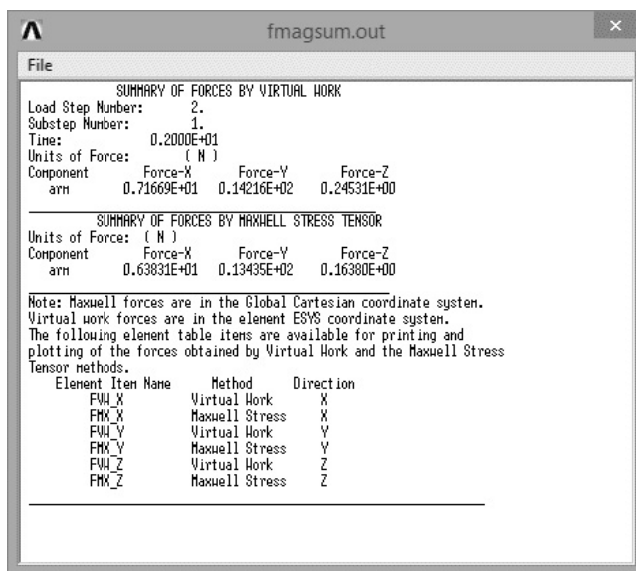
3-сурет. Электромагнит моделі

Электромагнитті модельдеудің келесі кезеңінде орамның параметрлері белгіленеді: орамдардың саны, ішкі радиус, сыртқы радиус, орамдағы ток күші, орамның қалыңдығы мен электромагниттің полюстерін анықтайтын токтың бағытын белгілеу. Берілген жағдайда ток күші сағат тілінің бағытымен бағытталса болса, онда төменгі жақта оңтүстік полюс, ал жоғары жақта солтүстік полюс орналасады. Нәтижесінде алынған және есептеп шешуге дайын болатын модель 3-суретте көрсетілген, яғни ораммен қоршалған құрыш өзегінің төрттен бір бөлігі бейнеленген. Модель элементін айқын елестету үшін орам толығымен көрсетілген.

Электромагнит туғызатын тарту күшін полюстердің беттеріне әсер ететін магнит өрісін талдау нәтижесінде алынған Максвелл теңдеуі бойынша есептеуге болады. Егер де жұмыс саңылауындағы өріс біртекті және полюстер қанықпаған болса, онда Максвелл теңдеу келесі түрде болады:

$$P = \frac{1}{2\mu_0} B_b^2 = \frac{1}{2} \frac{F_b^2}{\mu_0 S^2},$$

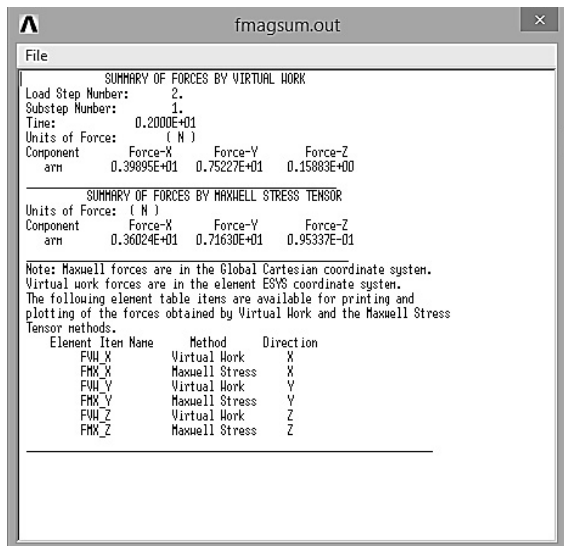
мұнда B_b (Тл) — индукция; F_b (Вб) — жұмыс саңылауындағы магнит ағыны; S (m^2) — полюстің ауданы.



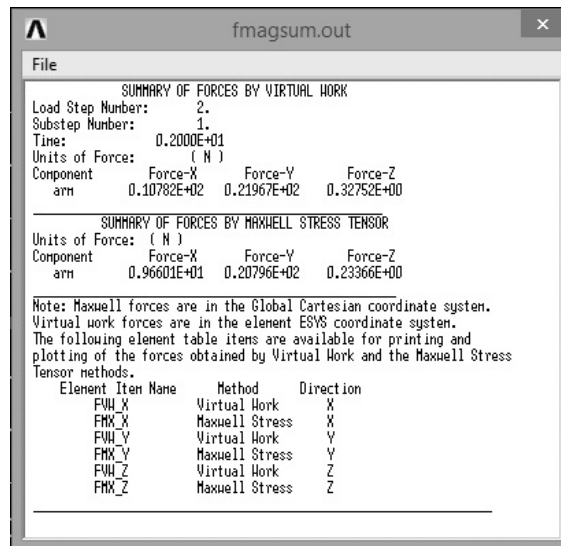
4-сурет. Модельді есептеу

Модельдің есептеуін ANSYS бағдарламасында жүргізген кезде электромагниттің тарту күші анықталып алынды (4-сур.). Электромагниттің тарту күшін электромагнитті көтергіш қондырғысының элементтерінің өзара күштік әсерлесуін талдау үшін анықтау қажет. Берілген модель қондырғының әр түрлі белгілі параметрлері үшін бірқатар виртуалды тәжірибелерді жүргізуге мүмкіндік береді. Бұл қондырғының физикалық моделіне жұмсалатын шығындарды үнемдеуге негіз бола алады.

Құрыш өзекті модельден басқа тәжірибелерде өзектің тағы да екі варианты қарастырылды: ферромагнитті материалдан жасалған өзек және темірден жасалған өзек. Есептеу магнит сипаттамаларының әр түрлі көрсеткіштері үшін жүргізілді. Нәтижесінде ферромагнитті өзегі бар электромагниттің тарту күшін есептеу 5 (а) суретте, ал темір өзегі бар электромагниттің тарту күшін есептеу 5 (б) суретте көрсетілген.



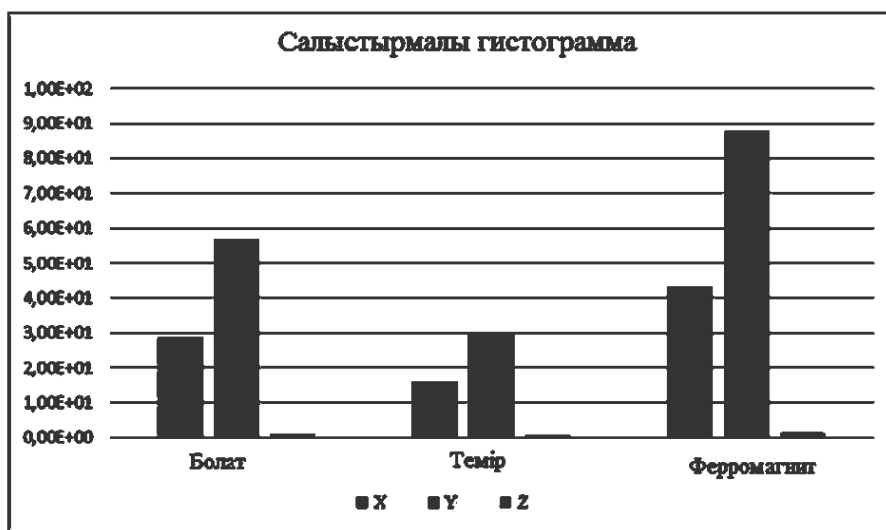
а)



б)

5-сурет. Темір (а) және ферромагнитті (б) өзектері бар модельді есептеу

Үш түрлі өзек үшін жүргізілген талдау мен есептеудің нәтижесінде 6-суретте келтірілген салыстырмалы гистограмма құрастырылды. Есептеу электромагниттің төрттен бір бөлігі үшін жүргізілгендіктен, тарту күші біздің жағдайда 4-ке көбейтіледі.



6-сурет. Салыстырмалы гистограмма

Электромагниттердің параметрлерін және ток күшін белгілі қадаммен өзгерте отырып, бірқатар тәжірибелер өткізіліп, электромагниттің тарту күшінің өзгерісі зерттелді. Берілген жұмыс скип электромагниттерінің электромагнитті көтергіш қондырғысының бағыттаушы қондырғыларының электромагниттерімен өзара әсерлесу моделін тұрғызудың бірінші кезеңі болып табылады.

Мақала ҚР БҒМ грантты қаржыландыру аумағында «Пайдалы қазбаларды өндіру технологиялары» басымдығы бойынша «Электромагнитті көтергіш қондырғысын жасау арқылы

тау кен массасын қазып алудың энергоүнемдеу технологиясын негіздеу және құрастыру» тақырыбы бойынша және «Энергетика және машина жасау» басымдығы бойынша «Энергоүнемдеу электромагнитті көтергіш қондырғысын комплексті қорғау мен автоматты басқару жүйесін жасау» тақырыбы бойынша орындалған жұмыстар нәтижелері негізінде жазылды.

Әдебиеттер тізімі

- 1 Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под общ. ред. Д.Г. Красковского. — М.: КомпьютерПресс, 2002. — С. 7.
- 2 Андреева Е.Г., Шамец С.П. Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета ANSYS: Учеб. пособие. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 1992. — 92 с.
- 3 Справочная система ANSYS 6.1, ANSYS Inc. — 2002. — 43 с.

А.А.Айкеева, Б.А.Жаутиков, К.С.Роговая, Ф.Б.Жаутиков, П.А.Мухтарова

Исследование системы «скип – направляющее устройство» электромагнитной подъемной установки

Статья направлена на моделирование элементов системы электромагнитной подъемной установки. Представлено описание принципов работы электромагнитной подъемной установки. Кроме того, проведено имитационное 3-D моделирование элементов системы «скип–электромагнит», а именно расположенных на скипе и направляющих устройств постоянных магнитов и электромагнитов. Каждый этап сопровождается рисунками с представлением элементов моделирования. По результатам 3-D моделирования представлен анализ трех элементов сердечника с предоставлением сравнительной графической диаграммы.

A.A.Aikeyeva, B.A.Zhautikov, X.S.Rogovaya, F.B.Zhautikov, P.A.Mukhtarova

The research of the «skip – guiding device» system of electromagnetic lifting installation

This work is aimed at modeling system elements of electromagnetic lifting installation. The paper presents the description of the principles of operation of the electromagnetic lifting installation. In addition, the simulation of 3-D modeling of system elements «skip–electromagnet», namely ones located on the skip and directing devices of constant magnets and electromagnets. Each stage of modeling is provided by figures with the image of modeling elements. According to the results of 3-D modeling this article presents the analysis of the three core elements providing comparative graphic diagram.

References

- 1 Bassov K.A. *ANSYS in examples and problems*, under the general edit. of D.G. Kraskovsky, Moscow: ComputerPress, 2002, p. 7.
- 2 Andreyeva E.G., Shamets S.P. *Calculation of stationary magnetic fields and characteristics of electrotechnic devices by means of the software package ANSYS*, Omsk: Publishing house OMGTU, 1992, 92 p.
- 3 Reference system ANSYS 6.1, ANSYS Inc., 2002, 43 p.

А.А.Молнар¹, И.П.Куритник², В.В.Герасимов³, Д.Ж.Карабекова⁴

¹Ужгородский государственный университет, Украина;

²Институт управления и инженерии продукции, Освенцим, Польша;

³Мукачевский государственный университет, Украина;

⁴Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова
(E-mail: karabekova71@mail.ru)

Пьезоэлектричество как источник электроэнергии для портативных электронных устройств в системе «человек–одежда»

Данная статья посвящена исследованию новых видов электроэнергии для питания портативных носимых устройств в системе «человек–одежда». Предложено использование пьезоэлектричества. Пьезоэлектричество является одним из альтернативных источников энергии для питания электронных портативных устройств. Выработка энергии предусматривается через внедрение специальных видов капсулированной керамики в деформационно-нагружаемые интерфейсные зоны системы «человек–одежда». Рассмотрены различные виды материалов (в частности, керамика), которые могли найти применение как источники энергии дополнительных модулей фиксации экстремальных состояний для работников спасательных служб.

Ключевые слова: пьезоэлектричество, человек, одежда, портативные устройства, электропитание.

В последнее время проблеме электропитания портативных электронных устройств уделяется все больше внимания. Сегодня практически каждый человек имеет, как минимум, одно портативное устройство — мобильный телефон. Не менее чем телефон распространены и используются такие устройства, как — MP3 плееры, планшеты и ряд других популярных гаджетов. Все эти устройства нуждаются в довольно мощных источниках портативного электропитания, в качестве которых, как правило, используются литий-ионные аккумуляторы. Как правило, для их подзарядки используется обычное подключение к электросети, что значительно снижает удобство эксплуатации. Поэтому существует задача по поиску новых альтернативных источников энергии для электропитания и подзарядки устройств. Причем важным моментом является то, чтобы такие источники были портативными и не ограничивали пользователя гаджета регулярным поиском стационарной розетки.

Одним из возможных источников электрической энергии для мобильных электронных изделий могут быть пьезогенераторы, которые вырабатывают энергию от движения человека.

Данные ожидаемого уровня электрической энергии от движения человеческого тела приведены в таблице 1. Как видно из таблицы, наибольшие значения электрической энергии, вырабатываемой человеком, связаны с ходьбой. Из сравнения генерируемой и потребляемой энергии понятно, что источники питания, связанные с ходьбой или дыханием, могут быть использованы в любом носимом приборе или устройстве.

Т а б л и ц а 1

Энергия, вырабатываемая человеком при различных видах движения

Активное действие	Генерируемая механическая энергия	Электрическая энергия	Количество энергии, затрачиваемое на движение
Дыхание	0.83 Вт	0.091-0.42Вт	0.5-2.5 Дж
Движение рук	3 Вт	0.33-1.5 Вт	1.5-6.7 Дж
Движение пальцев	6,9-19 мВт	0.76-2.1 мВт	143-266 мкДж
Ходьба	67 Вт	5 Вт	8.3-14 Дж

Пьезоэлектрические генераторы, основанные на движении верхних конечностей, в перспективе в состоянии обеспечивать питание GSM- и Bluetooth-устройств с низким энергопотреблением.

В качестве преобразователей движения в электрическую энергию наиболее простыми и перспективными считаются пьезоэлектрические преобразователи, работающие на деформации изгиба (вибрационные преобразователи) или на деформации сжатия.

Как правило, пьезоэлектрические генераторы являются преобразователями механической энергии (с давлением не менее 1–2 кН) в электрическую при циклическом нагружении. При этом переменное напряжение преобразуется с помощью мостовых выпрямителей в постоянное. Поскольку пьезоэлектрический преобразователь работает в течение продолжительного времени с относительно малой электрической энергией, производимой за один цикл, как правило, используется система накопления и хранения энергии (рис.). Для стабилизации выходного напряжения пьезогенератора на заданном уровне используется система с обратной связью, специальный контроллер. Контроллер также обеспечивает согласование импеданса пьезогенератора с выходным импедансом потребителя энергии.

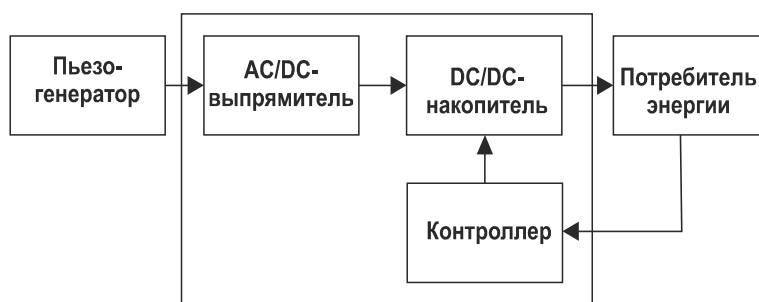


Рисунок. Блок-схема модуля питания

Для преобразования механической энергии в электрическую наиболее широко используются хорошо зарекомендовавшие себя материалы, такие как PZT-керамика (керамика на основе цирконата-титаната свинца, или ЦТС-керамика) или полимеры — PVDF поливинилиденфторид (ПВДФ) [1, 2].

Разновидностью PZT-керамики является коммерческий продукт PIC163 и PIC144. Данный тип керамики применяется многими американскими компаниями для изготовления пьезоэлектрических устройств, в частности компанией PI [3]. Однако, несмотря на высокую технологичность данных материалов, они не позволяют достичь максимальных коэффициентов преобразования. Поэтому по всему миру ведется интенсивный поиск новых альтернативных пьезоэлектрических материалов. Одним из них можно считать монокристалл $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$, для которого максимальное значение эффективного гидростатического пьезоэлектрического коэффициента составляет $d_h^{(1)} = 260$ pC/N. Для этого пластина $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ вырезается в плоскости (XYI)-20°. В случае изготовления композита на основе измельченного порошка $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ и, например, эпоксидной смолы расчетное значение $d_h^{(1)} = 136$ pC/N, что неплохо совпадает с полученными экспериментальными значениями [4].

Т а б л и ц а 2

Сравнения пьезокоэффициента разных материалов

	PIC163	PIC144	LiNbO ₃	Sn ₂ P ₂ S ₆
E	1200	1250	85	300
tg δ	0.01	0.004	0.1	0.001
$d_h^{(1)}$	600	265	70	260

Как видно из таблицы 2, несмотря на то, что по такому параметру, как гидростатический пьезоэлектрический коэффициент PZT-керамика PIC163 в два раза лучше $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$, однако по комбинации параметров (меньшее значение ϵ и tg δ) монокристалл $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ намного привлекательней. При изготовлении многослойных композитных пьезоэлектрических преобразователей на основе $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$, встраиваемых в одежду (преобразование растяжения, обусловленного дыханием) или в обувь [6] (часть подошвы под пальцами и каблук), по предварительным данным, мы можем получить 25–50 мВт электроэнергии, которая после накопления (в ионисторах-суперконденсаторах) вполне может быть использована для питания носимой электроники.

В то же время создание комплексной системы энергообеспечения «человек–одежда», куда бы обувь входила как неотъемлемая её часть, довольно проблематично, так как необходимо использование проводного соединения для отвода получаемой электрической энергии. Это приводит к значительному ухудшению показателя надежности и удобства конструкции в целом.

Одним из вариантов повышения эффективности работы пьезогенераторов в системе «человек–одежда» является их применение в спецодежде спасательных или пожарных служб. Данная спецодежда предусматривает использование дополнительных тяжелых носимых элементов в общей экипировке костюма спасателя — кислородные баллоны, пояса, различные спецсредства. Это приводит к появлению дополнительных статических и динамических нагрузок на поверхность тела человека [7] и в результате может использоваться как аддитивный источник электроэнергии.

Более того, по количеству «выкидываемой» пьезоэнергии за единицу времени (вычисления микроконтроллером) можно фиксировать величину внешнего «нагружения» спасателя в экстремальных случаях. В случае превышения допустимой нормы — оповещать о возникшей опасности специальными средствами беспроводной связи.

В данную систему довольно просто можно интегрировать ряд дополнительных датчиков — для измерения температуры (внешней и внутренней), пульса, артериального давления [8]. Это позволит на порядок повысить эффективность и информативность конструкции в целом.

Следует заметить, что ряд производителей электронных компонентов уже достигли успехов в разработке специальных средств обеспечения электропитанием проводных и беспроводных датчиков при их работе от альтернативных источников питания [9,10].

Таким образом, можно утверждать, что пьезоэлектричество является одним из альтернативных источников энергии для питания электронных портативных устройств.

Исследования показали, что наиболее подходящим материалом для практического применения являются керамические материалы на основе $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$. Эти пьезоматериалы, в случае их размещения в нагрузочно-деформационных зонах системы «человек–одежда», могут быть источниками электроэнергии. При этом открывается перспектива использования данных источников энергии как дополнительных модулей фиксации экстремальных состояний для работников спасательных служб.

Список литературы

- 1 *Maier M.M., Vysochanskii Yu.M., Prits I.P., Molnar Sh.B., Slivka V.Yu., Rogach E.D., Savenko F.I., Kudinov A.P.* Piezoelectric effect in $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ Single-Crystals // *Inorganic materials*. — 1991. — № 27. — P. 604–606.
- 2 *Maier M.M., Gurzan M.I., Molnar Sh.B., Prits I.P., Vysochanskii Yu.M.* Effect of Germanium Doping on Pyroelectric and Piezoelectric Properties of $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ Single Crystal // *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.* — 2000. — № 47. — P. 877–880.
- 3 [ЭР]. Режим доступа: Интернет ресурс: www.pi-usa.us
- 4 *Panoš Stanislav, Panošová Dagmar.* Influence of the sample orientation in $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ crystals on the hydrostatic piezoelectric coefficients // *Central European Journal of Physics*. — 2003. — Vol. 1. — Issue 1. — P. 91–99.
- 5 *Kymissis J., Kendall C., Paradiso J.J., Gershenfeld N.* Parasitic power harvesting in shoes // *Proc. 2-nd IEEE Int. Conf. Wearable Computing*. — Los Alamitos, August, 1998. — P. 45–47.
- 6 *Shenck N.S., Paradiso J.A.* Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectric // *Proc. IEEE Micro*. May-June, 2001. — Vol. 21. — № 3. — P. 34–37.
- 7 *Gerasimov V., Dulishkovich Y., Maga M.* Improving sensor system for measurement force loading parameters for clothing using a microcontroller // *Proc. IV Int. Conference «Inzynier XXI Wieku», ATH, Poland, 2014*. — P. 61–66.
- 8 *Куритник И.П., Молнар О.О., Герасимов В.В.* Розробка вимірювальної системи фіксації параметрів середовища «одяг-людина» для працівників пожежно-рятувальних служб // *Мат. міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми наукового та освітнього простору в умовах поглиблення євро інтеграційних процесів», 14–15 травня*. — Мукачево, 2015. — С. 333–334.
- 9 *Dave Salerno.* Extend remote sensor battery life with thermal energy harvesting // *Linear technology*. — 2015. — Vol. 25. — № 2. — P. 24–27.
- 10 *Бугаев В., Дидук В., Мусиенко М.* Сборщики энергии вибраций от Mide Technology приходят на смену батарейкам // *Новости электроники*. — 2015. — № 7. — С. 23–27.

А.А.Молнар, И.П.Куритник, В.В.Герасимов, Д.Ж.Карабекова

«Адам–киім» жүйесінде портативті электронды құрылғылар үшін пьезоэлектрлікті электр энергиясы көзі ретінде пайдалану

Мақала «адам–киім» жүйесінде портативті тасымалдағыш құрылғыларды қоректендіруге арналған электр энергияның жаңа түрлерін зерттеуге арналған. Пьезоэлектрлік әдісті қолдану ұсынылды. Пьезоэлектр электронды портативті құрылғыларды қоректендіруге қажетті балама энергия көзі болып табылады. «Адам–киім» жүйесінің деформациялық жүктелген интерфейстік зоналарында капсулалық керамиканың арнайы түрлерін енгізу арқылы энергияны өндіру алдын ала қарастырылды. Материалдың әр түрлі түрлері, соның ішінде қорғаныс қызметкерлері үшін төтенше жағдайларда қосымша тіркеу модульдерінде энергия көзі ретінде қолданыс табуы мүмкін керамика қарастырылған.

A.A.Molnar, I.P.Kuritnik, V.V.Gerasimov, D.Zh.Karabekova

Piezoelectricity as the source of electricity for portable electronic devices in the system «person–clothing»

This work is devoted to research of new types of electricity to power portable wearable devices in the system «man–clothes». Proposed use of piezoelectricity. Piezoelectricity is one of the alternative sources of energy to power the electronic handheld devices. Power generation provides through the introduction of special kinds of encapsulated strain-ceramic plate interface zone system «man–clothes». The various types of materials, such as ceramics, which can be used as energy sources additional modules fixing extreme conditions for rescue workers.

References

- 1 Maior M.M., Vysochanskii Yu.M., Prits I.P., Molnar Sh.B., Slivka V.Yu., Rogach E.D., Savenko F.I., Kudinov A.P. *Inorganic materials*, 1991, 27, p. 604–606.
- 2 Maior M.M., Gurzan M.I., Molnar Sh.B., Prits I.P., Vysochanskii Yu.M. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 2000, 47, p. 877–880.
- 3 [ЭР]. Режим доступа: Интернет ресурс: www.pi-usa.us
- 4 Panoš Stanislav, Panošová Dagmar. *Central European Journal of Physics*, 2003, 1, issue 1, p. 91–99.
- 5 Kymissis J., Kendall C., Paradiso J.J., Gershenfeld N. *Proc. 2-nd IEEE Int. Conf. Wearable Computing*, Los Alamitos, August, 1998, p. 45–47.
- 6 Shenck N.S., Paradiso J.A. *Proc. IEEE Micro. May-June*, 2001, 21, 3, p. 34–37.
- 7 Gerasimov V., Dulishkovich Y., Maga M. *Proc. IV Int. Conferenc «Inzynier XXI Wieku»*, ATH, Poland, 2014, p. 61–66.
- 8 Kurytnyk I.P., Molnar A.A., Gerasimov V.V. *Actual problems of scientific and educational space in terms of deepening European integration processes: Materials of International scientific-practical conference*, May 14–15, Mukachevo, 2015, p. 333–334.
- 9 Dave Salerno. *Linear technology*, 2015, 25, 2, p. 24–27.
- 10 Bugaev V., Diduk V., Musienko M. *Electronics News*, 2015, 7, p. 23–27.

А.К.Карбозова¹, К.М.Маханов¹, А.М.Мустафина¹, М.А.Маукебаева²

¹Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова;

²Жетысуский государственный университет им. И.Жансугурова

(E-mail: takanov@inbox.ru)

Применение NXT технологий в освоении основ робототехники в школе

В статье представлены результаты сравнения программных разработок, реализованных по технологии Lego Mindstorms NXT. Проведен сравнительный анализ скорости реализации программного кода, выполненного в двух разных вариантах. В первом случае программа написана в графической среде NXT-G, во втором — в среде RoboLab. Показано, что при использовании среды RoboLab робот выполняет маневры в два раза быстрее. Предложен пример, демонстрирующий отличия при реализации программы.

Ключевые слова: обучение программированию, робототехнические конструкторы, Lego Mindstorms NXT 2.0, Robolab, RobotC, NXT-G.

Введение

В 2015 г. в Казахстане впервые был проведен фестиваль робототехники «RoboLand – 2015», где команды из 6 школ города Караганды принимали участие в соревнованиях по пяти секциям. По правилам конкурса в соревнованиях могли участвовать только Lego конструкторы. В основном были представлены роботы, собранные на базе MINDSTORMS NXT 2.

При составлении программ для управления своими роботами школьники использовали наряду с графическими оболочками NXT-G и Robolab также и более гибкую среду RobotC [1, 2].

Результаты конкурса показали, что роботы команд, которые программировали в среде RobotC, оказались наиболее быстрыми и управляемыми: быстрее проходили дистанцию, совершали маневры и т.д. Менее «подвижными» оказались роботы, управление которых осуществлялось посредством программной среды Robolab. И наконец, следует отметить, что те роботы, которые были запрограммированы с использованием графической среды NXT-G, оказались самыми медлительными. Аналогичные результаты наблюдались и во время Международного конкурса «Робофинист – 2015», проходившего в сентябре 2015 г. в Санкт-Петербурге (Россия).

Таким образом, из сказанного выше следует, что для достижения наиболее высокой маневренности и скорости выполнения команд роботы-машинки, собранные на базе Lego-конструктора, предпочтительно программировать либо в среде Robolab, а еще лучше в RobotC. Однако использование последнего несколько затруднено. В первую очередь, нет достаточного количества литературных источников, плюс освоение языка занимает достаточно длительное время и требует знания большего количества команд, специального синтаксиса и лексики. По сравнению с ним освоение среды Robolab менее трудоемкое, к тому же имеется довольно большое количество учебников и пособий [3–5], в которых подробно рассматриваются те или иные комбинации при построении программного кода.

Нами была предпринята попытка на примере своих разработок продемонстрировать возможности построения программ для прохождения трассы в секции «Ралли» за максимально короткое время.

Цель настоящей работы — на примере построения простых программ показать различия в применении графической среды NXT-G и Robolab при решении задач, связанных с прохождением сложной трассы (ралли). В основу статьи был положен опыт работы со школьниками в кружке «Основы робототехники», который организован в 2013 г. во Дворце детей и юношества г. Караганды. Также использованы результаты и опыт ведения занятий курса «Робототехника» в ШОД «Дарын» и «Мурагер». Несмотря на сравнительно короткую историю (не более 1,5 года), учащиеся данных школ

сумели добиться высоких результатов и продемонстрировали свои способности как на республиканских, так и на международных конкурсах (в Санкт-Петербурге, 2015 г.).

Достижение поставленной цели осуществлялось путем решения следующих задач:

- разработка и сборка конструкции с учетом использования наименьшего количества деталей, что способствовало бы малому весу;
- освоение среды программирования NXT-G;
- освоение среды программирования Robolab;
- изготовление макета с траекторией трассы;
- набор программы, тестирование и оценка времени прохождения трассы.

При сборке необходимой конструкции робота-машинки, используемой в секции ралли, необходимо понимать, что мощность всех сервоприводов примерно одинакова (зависит от степени заряда аккумуляторов). Следовательно, машина, имеющая наименьший вес, имеет больше шансов для быстрого достижения финишной черты. Исходя из этих соображений была сконструирована простая конструкция робота-машинки, внешний вид которой представлен на рисунке 1.

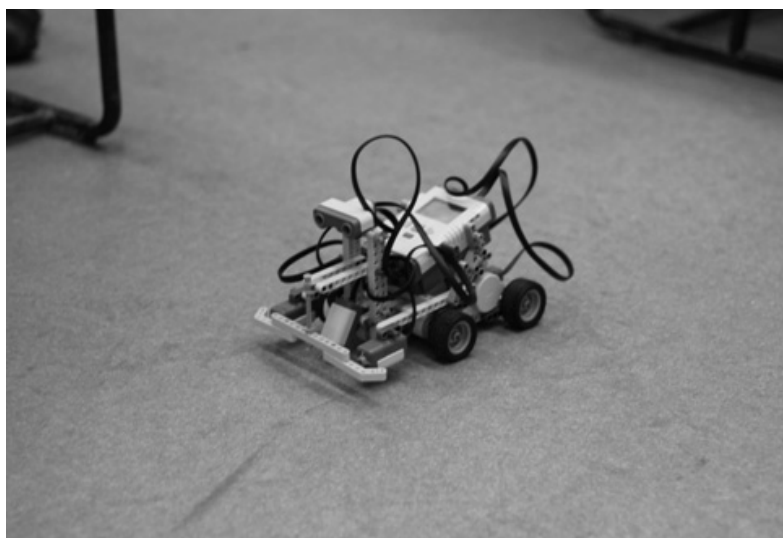


Рисунок 1. Конструкция простого робота-машинки

Следующий этап работы был посвящен программированию в графической среде NXT-G.

На данном этапе была поставлена цель — изучить способы организации повторяющихся действий в языке NXT-G; способы передачи данных между блоками.

Данная среда в прямом смысле графическая, так как при «написании» программ используются готовые блок-схемы, так называемые иконки.

Рассмотрим вкратце основы среды NXT-G. Графическая среда NXT-G используется для программирования модуля NXT Brick. Данный софт имеет интуитивно понятный интерфейс. Создание программ управления роботами напоминает создание блок-схем и осуществляется с помощью специальных блоков, размещаемых на LEGO-балках вдоль оси последовательности действий. Порядок выполнения программы определяется порядком следования блоков. Подключение новых компонентов выполняется путем их «перетаскивания» с палитры программирования на LEGO-балку, как показано на рисунке 2.

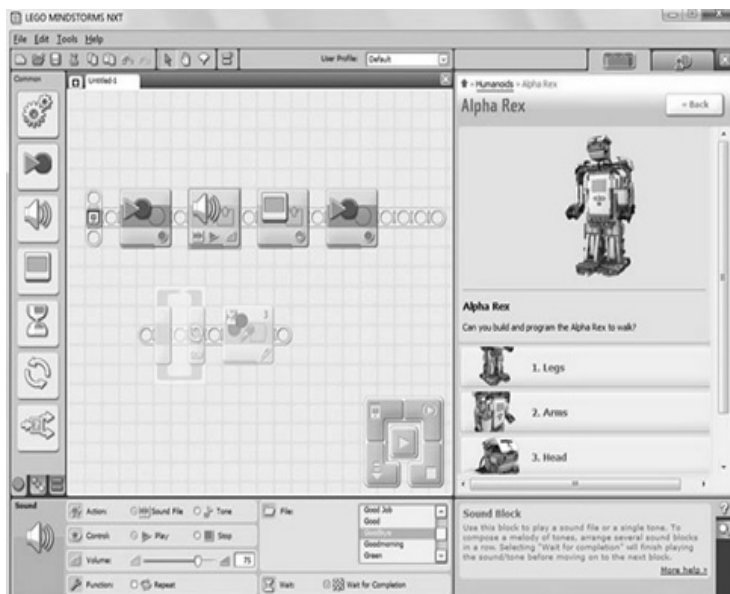


Рисунок 2. Внешний вид палитры программирования и Lego-балки

Каждый из иконок-блоков обладает набором уникальных характеристик, определяющих поведение робота. Например, блок «Движение», предназначенный для активации моторов, имеет параметры продолжительности хода и направления, а также мощность, передаваемую на двигатели. В NXT-G имеются блоки: для арифметических операций (сложения, вычитания, умножения и деления), для таймеров, для переменных, для сравнения числовых значений (меньше, равно, больше). Присутствуют блоки, отвечающие за звуковые эффекты роботов или за возможность бесконечного повторения установленных действий и за их завершение по определенным событиям. В программе возможно создание своих собственных компонентов, каждый из которых будет являться последовательностью стандартных блоков, объединенных вместе.

Кроме того, платформа NXT-G включает в себя: подробные инструкции по сборке огромного ряда моделей роботов LEGO; дополнительные инструменты для создания изображений, редактирования звуков и калибровки сенсоров; контроллер для передачи, запуска и остановки созданных программ и просмотра справочной информации о микрокомпьютере (ресурсах памяти, параметрах связи и т.д.). Имеется возможность дистанционного управления подключенного к компьютеру робота.

Среди основных достоинств среды графического программирования — наглядность и простота в использовании, позволяющие быстро освоить программное обеспечение, без особых знаний и усилий. Однако диапазон функциональных возможностей NXT-G весьма ограничен и требует для работы значительных ресурсов персонального компьютера. Последнее, в свою очередь, является существенной преградой при разработке сложных проектов.

Отметим также, что платформа NXT-G была разработана специально для LEGO специалистами компании National Instruments. Данная среда программирования создана на основе собственного продукта компании — программного обеспечения LabVIEW.

В целом опыт работы показал, что использование данной среды наиболее эффективно применительно к детям младшего возраста, т.е. к учащимся 5, 6^х классов.

Дальше мы рассмотрим итоги реализации следующей задачи — освоение среды программирования RoboLab. Необходимо сразу отметить, что на уроках по робототехнике наибольшую популярность среди среднего звена (7–9 классы) приобрела именно среда RoboLab. По сути, она является также графической, но предоставляет больше возможностей и маневренности при составлении программ [1].

RoboLab — это многофункциональная графическая среда программирования, которая также создана на основе LabView и ориентирована на самые разные возрасты — от дошкольников до студентов. RoboLab позволяет программировать несколько типов микроконтроллеров — Control Lab, RCX, NXT, а также проводить независимые расчеты на компьютере.

При запуске RoboLab предлагает три уровня работы: Администратор, Программист и Исследователь. Нажатие на кнопку Выход завершит работу RoboLab.

Нажатием на кнопку Помощь вызывается контекстная справка об объектах, расположенных под указателем мыши.

Кнопка Авторы открывает список разработчиков.

При запуске среды на экране появляются два основных окна, относящихся к одному проекту: Front Panel и Block Diagram. Первое (Передняя панель) для программирования не пригодится, но его можно использовать в режиме Исследователя. Второе, в котором уже расположены две пиктограммы светофоров (рабочее поле программы), предназначено для составления программы. Его можно развернуть на весь экран и приступить к работе. Два вспомогательных окна — Tools Palette и Functions Palette содержат все необходимое для составления программы. В случае закрытия их снова можно вывести на экран через пункт Windows верхнего меню.

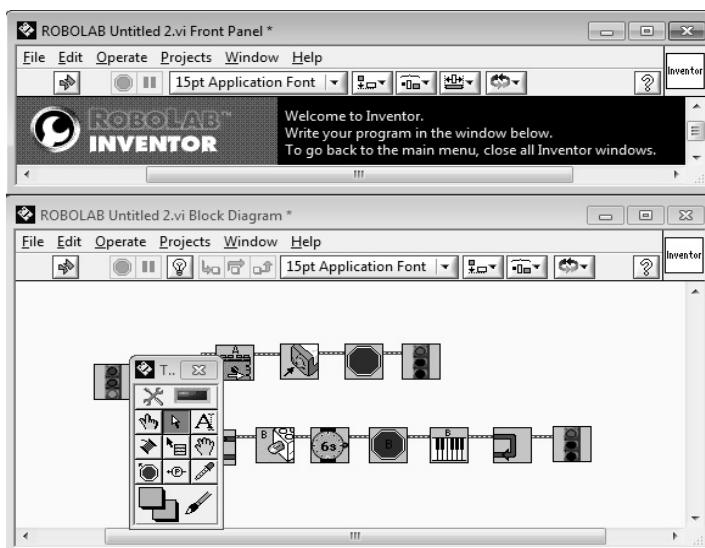


Рисунок 3. Пример программирования в среде RoboLab

Программа похожа на блок-схему, положенную на левый бок. Она читается слева направо, хотя блоки располагать можно как угодно. Блоки команд находятся в окне Functions Palette (Палитра команд). Они связываются между собой проводами, а также управляются инструментами, находящимися в меню Tools Palette (Палитра инструментов).

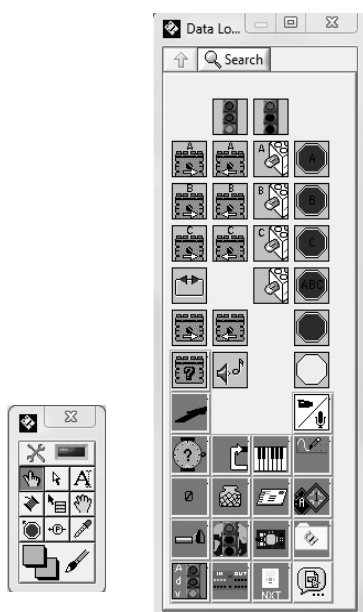


Рисунок 4. Палитра команд и палитра инструментов

Дальше мы самостоятельно приготовили каркас будущей трассы. Расчет траектории движения и уровень сложности основаны на реальных трассах, используемых в соревнованиях. Вид используемой нами трассы представлен на рисунке 5.

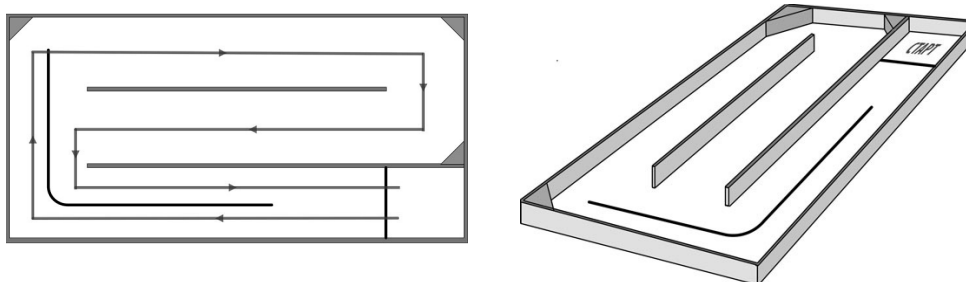


Рисунок 5. Вид трассы, которую должен проехать робот за минимальное время

Последняя задача по «написанию» программы, тестированию и отладке нами была осуществлена с участием учеников 7 класса.

Алгоритм разработанной программы работает по следующему порядку. При включении питания робот находится в режиме ожидания и ждет развития событий, запрашивая данные с датчиков, в частности, с ультразвукового датчика, предназначенного для определения расстояния до ближайшего препятствия. Реализуется следующий алгоритм: «если расстояние до препятствия менее 20 сантиметров, то робот «разворачивается» на 30° (либо вправо, либо влево). Если ультразвуковой датчик «сигнализирует» о наличии препятствия, то робот «разворачивается» в обратном направлении на 60° и делает 5 оборотов двигателя вперед». Цикл повторяется до тех пор, пока ультразвуковой датчик не покажет отсутствие препятствия. Следует отметить, что во время реальных соревнований участникам дается дополнительное время для изменения программы, и тогда участники могут подогнать код программы под конкретную трассу. В нашем случае мы за основу брали показания ультразвукового датчика. Предполагалось, что траектория неизвестна, т.е. робот должен преодолеть любую трассу.

Второй датчик, «датчик касания», срабатывает при наличии препятствий (расположенные очень низко либо очень узкие), которые не были обнаружены ультразвуковым датчиком. При активации данного датчика реализуется алгоритм программы, схожий с приведенным выше.

Таким образом, задача робота — за минимальное время преодолеть препятствие. Ниже на рисунке 6 представлен вид программы, разработанной в среде NXT-G (a) и RoboLab (b).

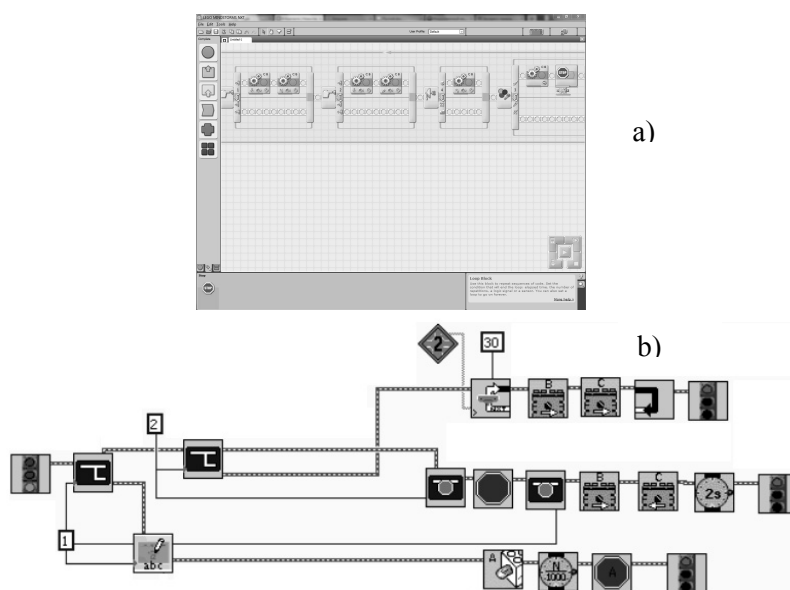


Рисунок 6. Коды программ для прохождения трассы с препятствиями, написанные в средах NXT-G (a) и RoboLab (b)

По результатам прохождения трассы нами было установлено, что в обоих случаях робот проходит трассу. Однако в случае использования программы, разработанной в среде NXT-G (рис. 6 а), он тратит больше времени и преодолевает трассу за 4 минуты, а в случае использования среды RoboLab (рис. 6 б) на преодоление той же трассы уходит около 2 минут.

Большое различие во времени прохождения трассы объясняется тем, что возможности оболочек для программирования сильно различаются. Особенно различие проявляется при преодолении угловых разворотов. В случае использования среды NXT-G программист может осуществить разворот следующим образом: он «останавливает» двигатель одного колеса и продолжает вращение второго (в зависимости от того, в какую сторону надо повернуть). В случае применения среды RoboLab оба двигателя не прекращают вращение, только вращаются в разные стороны, что способствует более быстрому завершению маневра. Это, конечно же, далеко не единственный пример имеющихся различий, но он дает возможность явно продемонстрировать отличия. Также управление при помощи RoboLab будет более точным, так как этот язык позволяет вести расчеты в формате с плавающей точкой. Такие расчеты особо актуальны при программировании робота на олимпиаде, конкурсе и т.д.

Выводы

В заключение еще раз проведем небольшое сравнение языков RoboLab и NXT-G. NXT-G поставляется вместе с конструктором Lego. RoboLab покупается отдельно. Тем не менее RoboLab представляет собой более мощное средство программирования, поскольку поддерживает некоторые команды языка СИ.

Для занятий в робототехническом кружке RoboLab слишком сложен, программы громоздки и не полностью интуитивно понятны. NXT-G прост и понятен, программы легко читаются. Программирование простейших действий (движения) может укладываться в одну–две команды. Все параметры команды настраиваются в отдельном окне и хранятся внутри блока команды, не загромождая программный код. В RoboLab параметры в виде разноцветных модификаторов сетью опутывают код, что снижает его читаемость и понятность. Но плюс такого подхода в том, что несколько команд могут быть подключены к одному модификатору. Еще одна проблема — вывод данных на дисплей. В NXT-G все элементарно — для вывода информации выделена всего одна команда, которая может выводить текст, изображение или чертеж. Для вывода числовых данных предусмотрена команда приведения типа в RoboLab. Для работы с дисплеем представлена целая серия команд, что не совсем удобно. Более того, не ясно, как выводить числовые данные (команды приведения типов отсутствуют). Огромный минус RoboLab состоит в том, что в нем перемешаны команды для RCX и для NXT, причем не все старые команды можно использовать с новым контроллером. А иногда, напротив, происходит дублирование команд, что вынуждает нас изучать аналогичные конструкции. Хотя разработчики утверждают, что RoboLab поддерживает программирование на СИ, далеко не все возможности языка могут быть реализованы в текстовом виде. В основном тексте можно записать арифметические операции и функции.

Делая общий вывод, можно сказать, что каждый из языков программирования имеет свои достоинства и недостатки. RoboLab неплохо подходит для программирования роботов на соревнованиях, но более сложен в изучении, нежели NXT-G. Последний, в свою очередь, менее функционален в плане точных расчетов, чем RoboLab.

Список литературы

- 1 Филиппов С.А. Робототехника для детей и родителей / Под ред. А.Л. Фрадкова. — СПб.: Наука, Сер. «Шаги в кибернетику», 2010. — 320 ст.
- 2 Lego Mindstorms. Статья в Wiki. — [ЭР]. Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Lego_Mindstorms.
- 3 LEGO–конструирование — [ЭР]. Режим доступа: <http://www.homeedu.ru/user/uatml/00000011/oneurok/docum/vved.htm>.
- 4 Конструкторы LEGO DACTA в курсе информационных технологий, введение в робототехнику. — М.: Ин-т новых технологий, 2001.
- 5 Разовый набор Lego Dacta (книга учителя) ИНТ, 2009780RM.
- 6 Ананьевский М.С., Болтунов Г.И., Зайцев Ю.Е., Матвеев А.С., Фрадков А.Л., Шиегин В.В. Санкт-Петербургские олимпиады по кибернетике / Под ред. А.Л. Фрадкова, М.С. Ананьевского. — СПб.: Наука, 2006.
- 7 История робототехники. С древности до наших дней. — [ЭР]. Режим доступа: <http://www.myrobot.ru/articles/hist.php>.

А.К.Карбозова, К.М.Маханов, А.М.Мустафина, М.А.Маукебаева

NXT-технологиясын мектепте робототехника негіздерін меңгеру үшін қолдану

Мақалада Lego Mindstorms NXT-технологиясы бойынша өңделген программалық өнімдерді салыстыру нәтижелері келтірілген. Екі әр түрлі тәсілмен құрастырылған программалардың орындалу жылдамдықтарына салыстырмалы талдау жүргізілді. Бірінші тәсіл бойынша программа графикалық NXT-G ортасында өңделді, екінші жағдайда — RoboLab ортасында. RoboLab ортасын қолданған кезде робот барлық тапсырмаларды екі есе жылдам орындайтыны көрсетілген. Программаның орындалу ерекшеліктерін айқын байқауға мүмкіндік беретін мысал келтірілген.

A.K.Karbozova, K.M.Makhanov, A.M.Mustafina, M.A.Maukebaeva

NXT-technology in application mastered the basics of robotics school

This paper presents the results of a comparison of software development technology implemented by Lego Mindstorms NXT. There has been conducted a comparative analysis of implementation of the code realization rate implemented in two different ways. In the first case the program is written in a graphical field NXT-G, the second in the field of Robolab. It is shown that by using a medium Robolab robot performs maneuvers in half the time. We propose an example that demonstrates the differences in the implementation of the program.

References

- 1 Filippov S.A. *Robotics for kids and parents*, edit. A.L. Fradkov, Saint Petersburg: Science Series «Steps to cybernetics», 2010, 320 Art.
- 2 *Lego Mindstorms*. An article in the Wiki, [ER]. Access mode: http://en.wikipedia.org/wiki/Lego_Mindstorms.
- 3 LEGO-construction, [ER]. Access mode: <http://www.homeedu.ru/user/uatml/00000011/oneurok/docum/vved.htm>.
- 4 *Designers LEGO DACTA to date information technologies, introduction to robotics*, Moscow, INT, 2001.
- 5 *One-time set of Lego Dacta* (teacher's book) INT, 2009780RM.
- 6 Ananievski M.S., Boltunov G.I., Zaitsev Yu.E., Matveyev A.S., Fradkov A.L., Shiegin V.V. Saint Petersburg Olympiad on cybernetics, edit. A.L.Fradkov, M.S.Ananievski, Saint Petersburg: Nauka, 2006.
- 7 *The history of robotics. From ancient times to the present day*, [ER]. Access mode: <http://www.myrobot.ru/articles/hist.php>.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ МӘЛІМЕТТЕР СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Afanasyev, D.A.** — PhD, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Aikeyeva, A.A.** — Candidate of technical sciences, Associate professor, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Aitbaeva, Zh.M.** — Master student, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Akhmadiev, B.A.** — Senior lecturer, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Amanzholova, G.S.** — Master student, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Arinova, E.T.** — Physics teacher, Gimnasium № 1, Karaganda.
- Baklanov, A.E.** — Candidate of physical and mathematical sciences, Head of department, D.Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk.
- Balmukhan, I.N.** — Student, K.Zhubanov Aktobe Regional State University.
- Belov, N.A.** — Doctor of technical sciences, Professor, National University of Science and Technology «MIS and A», Moscow, Russia.
- Chirkova, L.V.** — Candidate of technical sciences, Docent, professor, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Dostayeva, A.M.** — PhD student, K.I.Satpayev Kazakh National Technical University, Almaty.
- Eremin, E.N.** — Doctor of technical sciences, Professor, Omsk State Technical University, Russia.
- Ermaganbetov, K.T.** — Candidate of physical and mathematical sciences, Docent, Professor, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Gerasimov, V.V.** — Doctor of physical and mathematical sciences, Professor, Mukachevo State University, Ukraine.
- Grigoryeva, S.V.** — PhD student, D.Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk.
- Guchenko, S.A.** — Junior Researcher, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Ibrayev, N.Kh.** — Doctor of physical and mathematical sciences, Professor, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Karabekova, D.Zh.** — Student PhD, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Karbozova, A.K.** — Master student, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Kuritnik, I.P.** — PhD, Institute of Management and Engineering of Products, Oswiencim, Poland.
- Kussaiynov, K.** — Doctor of technical sciences, Professor, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Laurinas, V.Ch.** — Candidate of physical and mathematical sciences, Associate professor, Head of department, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Makhanov, K.M.** — Candidate of physical and mathematical sciences, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Maukebaeva, M.A.** — Lecturer, I.Zhansugurov Zhetysu State University, Taldykorgan.
- Molnar, A.A.** — Doctor of physical and mathematical sciences, Professor, Uzhgorod State University, Ukraine.
- Mukhtarova, P.A.** — Assistant, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Mustafina, A.M.** — Master student, Ye.A.Buketov Karaganda State University.
- Ospanova, D.A.** — Senior lecturer, Ye.A.Buketov Karaganda State University.

Rogovaya, X.S. — Master student, Ye.A.Buketov Karaganda State University.

Sadenova, K.K. — Senior lecturer, Ye.A.Buketov Karaganda State University.

Sergeyev, D.M. — Candidate of physical and mathematical sciences, Associate professor, Chief scientist, Military Institute of Air Defense Forces, K.Zhubanov Aktobe Regional State University.

Serikov, T.M. — PhD student, Ye.A.Buketov Karaganda State University.

Shaimerdenova, K.M. — Candidate of technical sciences, Associate professor, Ye.A.Buketov Karaganda State University.

Shuyushbayeva, N.N. — Senior lecturer, Sh.Ualikhanov Kokshetau State University.

Smagulov, D.U. — Doctor of physical and mathematical sciences, Professor, K.I.Satpayev Kazakh National Technical University, Almaty.

Stoev, M. — Doctor of engineering, Neofit Rilski South-West University, Blagoevgrad, Bulgaria.

Syzdykova, A.Sh. — PhD student, Polytechnical College Corporation «Kazakhmys», Balkhash.

Yakovlev, A.N. — Candidate of physical and mathematical sciences, director of the Institute of high technologies, National Research Tomsk Polytechnic University, Russia.

Yurov, V.M. — Candidate of physical and mathematical sciences, Assistant professor, Director scientifically research center «Ion-plasma technologies and modern instrument-making», Ye.A.Buketov Karaganda State University.

Zeinidenov, A.K. — PhD, Ye.A.Buketov Karaganda State University.

Zhautikov, B.A. — Doctor of technical sciences, Professor, Vice-rector, Kh.Dosmukhamedov Atyrau State University.

Zhautikov, F.B. — Engineer, Ye.A.Buketov Karaganda State University.

**2015 жылғы «Қарағанды университетінің хабаршысында»
жарияланған мақалалардың көрсеткіші.
«Физика» сериясы**

№ б.

КОНДЕНСАЦИЯЛАНҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ

<i>Әбуова А.У., Ақылбеков А.Т., Инербаев Т.М., Әбуова Ф.У.</i> Перовскит құрылымы LaMnO_3 (001) бетіндегі құрылымдық және электрондық қасиеттерін үлгілеу.....	1	4
<i>Әлжанова А.Е., Даулетбекова А.Қ.</i> SiO_2/Si және $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ құрылымдардағы трек қалыптасуы.....	2	4
<i>Әлкенова А.Б., Азотте А., Портнов В.С.</i> Молибдендік минералдар дезинтеграциясының физика-техникалық мәселелері.....	1	9
<i>Көкетай Т.Ә., Ыбыраева А.Д., Сыздықова З.Р.</i> Европий нитраты және оксидімен белсендірілген калий сульфатының рекомбинациялық люминесценциясын зерттеу.....	2	18
<i>Қаптағай Г.А.</i> Co_3O_4 (100) бетінің су молекуласын ыдыратуда цезиймен қоспалау кезіндегі каталикалық қасиеттерін квантты-химиялық есептеу.....	2	9
<i>Лауринас В.Ч., Сыздықова А.Ш., Еремін Е.Н., Гученко С.А., Юров В.М.</i> Қоспалы болат қабыршақтарының тотығу тұрақтылығы және қызуға төзімділігі.....	4	24
<i>Лисицын В.М., Кәріпбаев Ж.Т., Даулетбекова А.К., Туңиқына И.А.</i> ZnWO_4 кристалдарының импульстік люминесценциясының кинетикасы.....	1	15
<i>Платонова Е.С., Бучинская В., Юров В.М.</i> Металдар тотығу теориясының кейбір сұрақтары.....	1	21
<i>Платонова Е.С., Бучинская В., Юров В.М.</i> Металл жабындардың термиялық тұрақтылығы теориясының кейбір мәселелері.....	2	25
<i>Портнов В.С., Выжва С.А., Рева Н.В., Юров В.М.</i> Термометриядағы терең үдерістерге магнитті қабылдағыштық өлшем деректерін пайдалану.....	3	24
<i>Потапов А.А.</i> Фрактал-скейлингті немесе масштаб-инвариантты радиолокация туралы: мерейтойлық 2015 жылдан көзқарас.....	3	4
<i>Сергеев Д.М., Балмұхан И.Н.</i> Шашырау матрицасы негізінде барьердің салыстырмалы биіктігі $h_b = 3$ тең асқын өткізгіш туннельдік ауысымның вольт-амперлік сипаттамасын есептеу туралы.....	4	12
<i>Сергеев Д.М., Қыдырмағанбетова А.А., Шүңкеев Қ.Ш.</i> Асқын өткізгіш ангармоникалық нанотүйіспелерге сыртқы әлсіз магнит өрісінің әсері туралы.....	1	31
<i>Смагулов Д.У., Белов Н.А., Достаева А.М.</i> Al-0,5\%Zr қорытпаларының электр кедергісіне күйдірудің әсері.....	4	19
<i>Сыздықова А.Ш., Еремін Е.Н., Гученко С.А., Юров В.М.</i> Циркониймен легирленген болат жабындысының құрылымы және қасиеттері.....	3	32
<i>Сыздықова А.Ш., Еремін Е.Н., Гученко С.А.</i> Титанмен легирленген болат жабындысының құрылымы және қасиеттері.....	1	36
<i>Халенов О.С., Колесников В.А., Байсағов Я.Ж.</i> Диэлектриктердің электрофизикалық қасиеттерін зерттеу.....	1	46
<i>Халенов О.С., Коровкин М.В., Юров В.М.</i> Сілтілі және сілтіліжер сульфаттары кристалдарын өсірудің теориялық және эксперименталдық қырлары.....	1	56
<i>Чиркова Л.В., Ермаганбетов Қ.Т., Аринова Е.Т.</i> Шалаөткізгіштердегі тұрақсыздық және фазалық көшудегі ұқсастық.....	4	4
<i>Чиркова Л.В., Ермаганбетов Қ.Т., Аринова Е.Т., Өмірбек А.</i> Магнетиктердегі өз бетімен жүретін ұйымдастыру құбылыстары.....	2	34

ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ

<i>Әлібекова А.Р., Құсайынов Қ.Қ., Қамбарова Ж.Т., Танашева Н.Қ., Қарагаева М.Б.</i> Әр түрлі климаттық жағдайда табиғи жел кезіндегі тәжірибелік желэнергетикалық қондырғыны эксперименттік сынақтан өткізу.....	2	44
<i>Бакланов А.Е., Григорьева С.В., Яковлев А.Н.</i> Математикалық модельдеудің жылу массасын тасымалдау жүйесіндегі жоғарғы қуатты жарық диодының бөлінуі.....	4	31
<i>Бейсенбек А.Ж., Хасенов А.К., Нүсіпбеков Б.Р., Стоев М., Абдыкова Г.Ж.</i> Металқұрамды шикізатты электроимпульсті әдіспен өңдеу.....	3	40

<i>Бұлқайырова Г.А., Шаймерденова Г.М., Октябрь А.</i> Электрогидравликалық әдіспен өңделген кварц минералының микроқұрылымдық анализі мен коспа элементтерінің мөлшерін зерттеу.....	1	66
<i>Құсайынов Қ., Сатыбалдин А.Ж., Танашева Н.Қ., Тілеубергенова А.Ж., Саденова К.К.</i> Шұбаркөл көмірінің қалдықтарынан алынған сулы-көмірлі отынның шашырату ерекшелігін және физикалық қасиетін зерттеу.....	3	45
<i>Құсайынов Қ., Танашева Н.Қ., Тұрғынов М.М., Құсайынова Ә.Қ., Саденова К.Қ.</i> Айналмалы цилиндрдің ауа ағынындағы ағуын үлгілеу.....	1	74
<i>Құсайынов Қ., Танашева Н.Қ., Тілеубергенова А.Ж., Рожкова А.В., Сүлейменова С.Е.</i> Шұбаркөл көмірінің қалдықтарынан алынған сулы-көмірлі отынды бүрку үдерісін үлгілеу.....	1	71
<i>Құсайынов Қ., Шаймерденова К.М., Құтым Б.Б., Бұлқайырова Г.А., Ранова Г., Киврин В.</i> Суды гидроимпульстік өңдеу кезінде электродтық жүйенің құрылымы мен қасиеттеріне электр разрядтарының әсері.....	3	49
<i>Нүсіпбеков Б.Р., Джумаев А.М.</i> Жылуэлектр орталығы шығаратын түтін газдарының қоршаған ортаға әсері.....	2	49
<i>Нүсіпбеков Б.Р., Хасенов А.Қ., Жақиев Н.С., Әбдікова Г.</i> Электроимпульсті қондырғының басқару пультінің жаңа сұлбасын жобалау.....	2	56
<i>Сақыпова С.Е., Шуюмбаева Н.Н., Оспанова Д.А., Төсекбай А.Ә.</i> Айнымалы қималы арнада электрогидроимпульстік эффект кезінде қозғалатын газ сұйықты ағынның параметрлерін зерттеу....	2	61
<i>Секретарев Ю.А., Мехтиев А.Д., Югай В.В., Калиасқаров Н.Б., Есенжолов У.С.</i> Жылу электр станцияларында жөндеу және қалпына келтіру процестерін басқару.....	3	55
<i>Шуюмбаева Н.Н., Құсайынов Қ., Стоев М., Шаймерденова К.М., Оспанова Д.А., Ахмадиев Б.А., Саденова К.К.</i> U-тәрізді жер асты жылуалмастырғыштары маңындағы температураның өзгерісін зерттеу.....	4	39

АСПАПТАР ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТ ТЕХНИКАСЫ

<i>Завгородний А.В., Амочаева Г.П., Афанасьев Д.А.</i> Жұқа қабыршақтарды полионды құрастыруға арналған құрылғыны жобалау кезінде эксперименталды аспапты құрастыруда қазіргі заманғы әдістерді қолдану.....	2	68
<i>Зейниденов А.К., Ибраев Н.Х., Айтбаева Ж.М.</i> Анодтау әдісімен наноқұрылымдық кеуекті оксид алюминийді алуға арналған техникасын және әдісін әзірлеу.....	4	43
<i>Ибраев Н.Х., Афанасьев Д.А., Серіков Т.М., Аманжолова Г.С.</i> Кеуекті титан диоксидін синтездеу үшін магнетронды тозандандыру әдісімен титан қабыршақтарын алу.....	4	48
<i>Үмбетов Ә.Ү., Жұмбаева С.Б.</i> Акустооптикалық коррелятор.....	1	78

ТЕХНИКАЛЫҚ ФИЗИКА

<i>Айкеева А.А., Жаутиков Б.А., Жаутиков Ф.Б., Мухтарова П.А.</i> Шахталық және карьерлік электромагниттік көтергіш қондырғының скипінге түсетін жүктемелерді зерттеу.....	3	90
<i>Айкеева А.А., Жаутиков Б.А., Роговая К.С., Жаутиков Ф.Б., Мухтарова П.А.</i> Электромагниттік көтергіш қондырғысының «скип-бағыттаушы құрылғы» жүйесін зерттеу.....	4	57
<i>Мехтиев А.Д., Таткеева Г.Г., Югай В.В., Алдошина О.В., Черепанова И.В.</i> Ұялы телефон радиожіберуші құрылғысының электромагнитті сәулеленуінің адам ағзасына кері әсерін зерттеу.....	2	74
<i>Молнар А.А., Куритник И.П., Герасимов В.В., Карабекова Д.Ж.</i> «Адам–киім» жүйесінде портативті электронды құрылғылар үшін пьезоэлектрлікті электр энергиясы көзі ретінде пайдалану.....	4	62
<i>Мырзаханова С.Ж.</i> Электр энергия сапасын бақылау.....	1	83
<i>Овчаров М.С., Ошанов Е.З.</i> Автомобильдің тежеу берілісінің импульстік жүйесі.....	3	96
<i>Платонова Е.С., В.Бучинская, Юров В.М., Лауринас В.Ч.</i> Тау-кен құрал-жабдықтар бөлшектерін өндіруде коррозияға төзімді тұндыру технологиясы мен сызаттарға төзімді жабындылар.....	3	102

ФИЗИКАНЫ ОҚЫТУ ӘДІСТЕМЕСІ

<i>Бадаева Л.С., Ильина Л.Ф.</i> Орта мектепте физиканың дәстүрлі емес бөлімдерін оқыту (молекулалық физика мысалында).....	2	79
<i>Дәрібеков С.Д., Әменова Д.М., Мұхамед Н.</i> Қатты дене физикасындағы кристаллография элементтерін қалыптастыруда компьютерлік технологияны қолдану.....	1	90

<i>Ильина Л.Ф., Құралбаева Ж.Ш.</i> Орта мектеп үшін арналған электр және магнетизм тарауынан электрондық оқу-әдістемелік құралын жасау әдістемесі.....	2	86
<i>Карбозова А.К., Маханов К.М., Мустафина А.М., Маукебаева М.А.</i> NХТ-технологиясын мектепте робототехника негіздерін меңгеру үшін қолдану.....	4	66
<i>Құдусов А.С., Мусенова Э.К., Рысмағанбетова С.Қ., Ошанов Е.З., Махашев С.Т.</i> Бірыңғай ұлттық тестілеуге дайындалудың кейбір ерекшеліктері.....	3	110
<i>Мусенова Э.К., Сейсембекова Т.Е., Утепова А.С., Қазақпап Б.И.</i> Физика курсының оқытуда сандық ресурстарды қолданудың тиімділігі.....	3	116
<i>Мұсабекова А.М., Жұманова Р.И., Қамбарова Ж.Т.</i> Оқушылардың функционалдық сауаттылығын дамытуға бағытталған физиканы оқытудағы инновациялық тәсілдер.....	2	92
<i>Хамзина Б.Е., Қостангелдинова А.А., Қоңырова-Идрисова З.Қ., Құдусов А.С., Ахметова Т.Б., Қоңырбаева А.Қ.</i> Өзін-өзі реттеу оқушылардың үлгеріміне әсер ететін фактор.....	2	99
<i>Хамзина Б.Е., Қостангелдинова А.А., Қоңырова-Ыдырысова З.Қ., Құдусов А.С., Ахметова Т.Б., Қоңырбаева А.Қ.</i> Оқушылардың оқу іс-әрекетіндегі үлгеріміне өзін-өзі реттеудің ықпалы туралы.....	1	101
<i>Чиркова Л.В., Ермағанбетов Қ.Т., Аринова Е.Т.</i> Техникалық пәндердегі динамикалық хаос.....	1	95

РАДИОФИЗИКА ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНИКА

<i>Амочаева Г.П., Омарбекова Г.И., Сейсенбаева Г.С., Оңалбай Б.А.</i> Мәліметтерді сымсыз тарату технологиялары.....	3	62
<i>Архипов В.В., Орымбай Т.М.</i> Симметризация рәсімінің энергия-импульс тензорына әсер етуі.....	3	68
<i>Архипов В.В., Қыстаубаева А.Ж.</i> Анти-де Ситтер екі өлшемді кеңістігінде толқын теңдеуінің шешімі.....	3	74
<i>Бектурганов Ж.С., Қусайкин С.В.</i> Айнымалы жүктемелер ретінде транзисторларды қолдануы арқылы вольтамперлік сипаттаманы автоматты түрде өлшеу.....	3	79
<i>Дюсембекова А.С., Исмаилов Ж.Т.</i> Аперидоттық кері байланысты пайдаланып қадағалау жүйесінің динамикалық қасиеттерін арттыру.....	3	86

**Указатель статей, опубликованных
в «Вестнике Карагандинского университета» в 2015 году.
Серия «Физика»**

№ с.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

<i>Laurinas V.Ch., Syzdykova A.Sh., Eremin E.N., Guchenko S.A., Yurov V.M.</i> High-temperature strength and corrosion resistance of alloy steel coatings	4	24
<i>Portnov V.S., Vyzhva S.A., Reva N.V., Jurov V.M.</i> Use of data magnetic susceptibility measurements in the thermometer deep processes	3	24
<i>Smagulov D.U., Belov N.A., Dostayeva A.M.</i> Roasting effect on the electrical resistivity of the Al-0,5%Zr alloys.....	4	19
<i>Syzdykova A.Sh., Eremin E.N., Guchenko S.A., Jurov V.M.</i> Structure and properties of steel coating ligated zirconium	3	32
<i>Chirkova L.V., Ermaganbetov K.T., Arinova E.T.</i> Electronic mechanisms of instability in semiconductor structures.....	4	4
<i>Chirkova L.V., Ermaganbetov K.T., Arinova E.T., Omirbek A.</i> Self-organization in magnetic.....	2	34
<i>Абуова А.У., Акилбеков А.Т., Инербаев Т.М., Абуова Ф.У.</i> Моделирование структурных и электронных свойств поверхности (001) LaMnO ₃ структуры перовскита.....	1	4
<i>Альжанова А.Е., Даулетбекова А.К.</i> Трековое формирование в структурах SiO ₂ /Si и Si ₃ N ₄ /Si.....	2	4
<i>Алькенова А.Б., Азотте А., Портнов В.С.</i> Физико-технические проблемы дезинтеграции молибденовых минералов	1	9
<i>Каптагай Г.А.</i> Квантово-химические расчеты каталитических свойств поверхности (100) Co ₃ O ₄ при внедрении цезия для разложения молекулы воды.....	2	9
<i>Көкөтай Т.Ә., Ибраева А.Д., Сыздыкова З.Р.</i> Исследование рекомбинационной люминесценции сульфата калия, активированного нитратом и оксидом европия	2	18
<i>Лисицын В.М., Карипбаев Ж.Т., Даулетбекова А.К., Тулицына И.А.</i> Кинетика импульсной люминесценции кристаллов ZnWO ₄	1	15
<i>Платонова Е.С., Бучинская В., Юров В.М.</i> Некоторые вопросы теории коррозии металлов.....	1	21
<i>Платонова Е.С., В.Бучинская, Юров В.М.</i> Некоторые вопросы теории термической стойкости металлических покрытий	2	25
<i>Потапов А.А.</i> О фрактально-скейлинговой или масштабнo-инвариантной радиолокации: взгляд из юбилейного 2015 года	3	4
<i>Сергеев Д.М., Балмухан И.Н.</i> О расчете вольт-амперной характеристики сверхпроводящего туннельного перехода на основе матрицы рассеяния при относительной высоте барьера $h_b = 3$...	4	12
<i>Сергеев Д.М., Кыдырмаганбетова А.А., Шункеев К.Ш.</i> О влиянии внешнего слабого магнитного поля на сверхпроводящие ангармонические наноконтакты	1	31
<i>Сыздыкова А.Ш., Еремин Е.Н., Гученко С.А.</i> Структура и свойства стальных покрытий, легированных титаном	1	36
<i>Халенов О.С., Колесников В.А., Байсагов Я.Ж.</i> Измерение электрофизических свойств диэлектриков	1	46
<i>Халенов О.С., Коровкин М.В., Юров В.М.</i> Теоретические и экспериментальные аспекты выращивания кристаллов щелочных и щелочноземельных сульфатов.....	1	56

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

<i>Kussaiynov K., Satybalidin A.Zh., Tanasheva N.K., Tleubergenova A.Zh., Sadenova K.K.</i> Investigation of physical characteristics and atomizing properties of coal-water slurry fuel from the sludge of Shubarkul coal	3	45
<i>Shuyushbayeva N.N., Kussaiynov K., Stoev M., Shaimerdenova K.M., Ospanova D.A., Akhmadiev B.A., Sadenova K.K.</i> Study of regularities of changes in the temperature near the U-shaped ground heat exchangers	4	39
<i>Алибекова А.Р., Кусаиынов К.К., Камбарова Ж.Т., Танашева Н.К., Карагаева М.Б.</i> Экспериментальные испытания опытной ветроэнергетической установки при различных климатических условиях.....	2	44

<i>Бакланов А.Е., Григорьева С.В., Яковлев А.Н.</i> Математическое моделирование тепломассо-переноса в системе теплоотвода для светодиода высокой мощности	4	31
<i>Бейсенбек А.Ж., Хасенов А.К., Нусупбеков Б.Р., Стоев М., Абдыкова Г.Ж.</i> Обработка металлосодержащего сырья электроимпульсным методом	3	40
<i>Булкаирова Г., Шаймерденова Г.М., Октябрь А.</i> Исследование микроструктуры и элементного состава минерала кварца, обработанного электрогидравлическим методом.....	1	66
<i>Кусаиынов К., Танашева Н.К., Тлеубергенова А.Ж., Рожкова А.В., Сулейменова С.Е.</i> Моделирование процесса распыления водоугольного топлива, полученного из шламов шубаркульского угля.....	1	71
<i>Кусаиынов К., Танашева Н.К., Тургунов М.М., Кусаиынова А.К., Саденова К.К.</i> Моделирование картины обтекания вращающегося цилиндра в потоке воздуха	1	74
<i>Кусаиынов К., Шаймерденова К.М., Кутум Б.Б., Булкаирова Г.А., Ранова Г., Киврин В.</i> Воздействие электрических разрядов на структуру и свойства электродной системы при гидроимпульсной обработке воды	3	49
<i>Нусупбеков Б.Р., Джумаев А.М.</i> Влияние выбросов дымовых газов теплоэлектростанций на окружающую среду	2	49
<i>Нусупбеков Б.Р., Хасенов А.К., Жакиев Н.С., Абдыкова Г.</i> Проектирование новой схемы пульта управления электроимпульсной установки.....	2	56
<i>Сакипова С.Е., Шуюмбаева Н.Н., Оспанова Д.А., Тосекбай А.А.</i> Исследование параметров газового жидкого потока, движущегося во время электрогидроимпульсного эффекта по переменному каналу.....	2	61
<i>Секретарев Ю.А., Мехтиев А.Д., Югай В.В., Калиаскаров Н.Б., Есенжолов У.С.</i> Управление ремонтно-восстановительными процессами на тепловых станциях	3	55

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

<i>Завгородний А.В., Амочаева Г.П., Афанасьев Д.А.</i> Использование современных методов конструирования экспериментальных приборов при разработке установки для полиионной сборки тонких пленок	2	68
<i>Зейниденов А.К., Ибраев Н.Х., Айтбаева Ж.М.</i> Разработка техники и методики получения наноструктурированного пористого оксида алюминия методом анодного окисления.....	4	43
<i>Ибраев Н.Х., Афанасьев Д.А., Сериков Т.М., Аманжолова Г.С.</i> Получение пленок титана методом магнетронного распыления для синтеза пористых пленок диоксида титана	4	48
<i>Умбетов А.У., Жумабаева С.Б.</i> Акустический коррелятор	1	78

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

<i>Platonova E.S., Buchinskas V., Jurov V.M., Laurinas V.Ch.</i> Technology deposition of corrosion-resistant and scratch-resistant coating on the details of mining equipment	3	102
<i>Айкеева А.А., Жаутиков Б.А., Роговая К.С., Жаутиков Ф.Б., Мухтарова П.А.</i> Исследование системы «скип–направляющее устройство» электромагнитной подъемной установки	4	57
<i>Айкеева А.А., Жаутиков Б.А., Жаутиков Ф.Б., Мухтарова П.А.</i> Исследование нагрузок на скип шахтной и карьерной электромагнитной подъемной установки.....	3	90
<i>Мехтиев А.Д., Таткеева Г.Г., Югай В.В., Алдошина О.В., Черепанова И.В.</i> Исследование негативного воздействия на организм человека электромагнитного излучения радиопередающих устройств сотовых телефонов	2	74
<i>Молнар А.А., Куритник И.П., Герасимов В.В., Карабекова Д.Ж.</i> Пьезоэлектричество как источник электроэнергии для портативных электронных устройств в системе «человек–одежда».....	4	62
<i>Мурзаханова С.Ж.</i> Контроль качества электроэнергии	1	83
<i>Овчаров М.С., Ошанов Е.З.</i> Импульсная система тормозного привода автомобиля.....	3	96

МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИКИ

<i>Chirkova L.V., Yermaganbetov K.T., Arinova Ye.T.</i> Issues of dynamic chaos in technical discipline	1	95
<i>Khamzina B.E., Kostangeldinova A.A., Konurova-Idrissova Z.K., Kudussov A.S., T.B.Akhmetova, Konyrbaeva A.K.</i> Self-regulation of students as a factor influencing the success in learning process ..	2	99

<i>Khamzina B.Ye., Kostangeldinova A.A., Konurova-Idrissova Z.K., Kudussov A.S., Akhmetova T.B., Konyrbayeva A.K.</i> The impact of self-regulation of students' educational activity on success in learning process	1	101
<i>Бадаева Л.С., Ильина Л.Ф.</i> Изучение нетрадиционных разделов физики в средней школе (на примере молекулярной физики)	2	79
<i>Дарибеков С.Д., Аменова Д.М., Мухамед Н.</i> Использование компьютерной технологии для формирования кристаллографических элементов физики твердого тела.....	1	90
<i>Ильина Л.Ф., Куралбаева Ж.Ш.</i> Методика разработки электронного учебно-методического пособия по электричеству и магнетизму для средней школы	2	86
<i>Карбозова А.К., Маханов К.М., Мустафина А.М., Маукебаева М.А.</i> Применение NХТ-технологий в преподавании школьного курса физики	4	66
<i>Кудусов А.С., Мусенова Э.К., Рысмаганбетова С.К., Ошанов Е.З., Махашев С.Т.</i> Некоторые особенности при подготовке к Единому национальному тестированию	3	110
<i>Мусабекова А.М., Жуманова Р.И., Камбарова Ж.Т.</i> Инновационные подходы к преподаванию физики, направленные на развитие функциональной грамотности учащихся	2	92
<i>Мусенова Э.К., Сейсембекова Т.Е., Утепова А.С., Казанкап Б.И.</i> Эффективность использования электронных ресурсов на уроках физики	3	116

РАДИОФИЗИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

<i>Arkhipov V.V., Kystaubayeva A.Zh.</i> The solution of a wave equation in two-dimension anti-de Sitter space	3	74
<i>Bekturhanov Zh.S., Kussaikin S.V.</i> Automatic current-voltage characteristic measurement using transistors as variable load	3	79
<i>Амочаева Г.П., Омарбекова Г.И., Сейсенбаева Г.С., Оналбай Б.А.</i> Технологии беспроводной передачи данных	3	62
<i>Архипов В.В., Орымбай Т.М.</i> Влияние на тензор энергии-импульса процедуры симметризации.....	3	68
<i>Дюсембекова А.С., Исмаилов Ж.Т.</i> Улучшение динамических свойств следящих систем при помощи аperiодических обратных связей	3	86