

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



Дежурный пост 1
с встроенным
радиомодемом

Дежурный пост 2
с встроенным
радиомодемом

Дежурный пост N
с встроенным
радиомодемом



К статье «Применение беспроводных систем
мониторинга и связи в энергетике»



3 2012

МАЙ— ИЮНЬ

Издательство «Политехпериодика»



E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua
Login Skype: politehperiodika, тел. +38 (048)728-18-50, тел./факс 728-49-46

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

ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

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

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев) и в Реферативном журнале ВИНТИ (г. Москва)

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

В Украине Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.
Подписное агентство «Идея», www.idea.com.ua. Индекс 11146.
Подписное агентство «KSS», www.kss.kiev.ua. Индекс 20363.
В России Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
В Белоруссии Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 71141.
В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.



Номер выпущен при поддержке
ЗАО «Укрналит» (г. Киев),
НПП «Карат» (г. Львов),
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

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

E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua,
тел. +38 (048)728-18-50,
тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко,
А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Подписано к печати 25.06.2012. Формат 60х84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 6,5+1,0. Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 250 экз. Заказ № 174.

Издательство «Политехпериодика»
(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии издательства «ART-V»
(65091, г. Одесса, ул. Комитетская, 24а).

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2012

№ 3

Год издания 36-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмилё

СОДЕРЖАНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Д.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)
Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)
К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)
Н. В. Кончиц (г. Киев)
Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин (г. Киев)
Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса)
Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. С. Г. Антошук (г. Одесса)
Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)
Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)
К.т.н. Э. Н. Глушеченко,
зам. гл. редактора (г. Киев)
Д.т.н. В. В. Данилов (г. Донецк)
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. редактора (г. Одесса)
К.т.н. А. А. Ефименко,
ответственный секретарь (г. Одесса)
Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)
Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
Д.т.н. В. П. Малахов (г. Одесса)
К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)
Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)
Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)
К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)
К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)
Д. ф.-м. н. М. И. Самойлович
(г. Москва)
Д.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)
Д. т. н. Я. Стеванович (г. Белград)
Д. т. н. З. Стевич (г. Белград)
Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)
Д.т.н. В. М. Шокало (г. Харьков)
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

Министерство промышленной полити-
ки Украины
Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарёва
Научно-производственное
предприятие «Сатурн»
Одесский национальный
политехнический университет
Издательство "Политехпериодика"

Одобрено к печати Ученым советом
ОНПУ
(Протокол № 10 от 05.06 2012 г.)

Техническая политика

Применение беспроводных систем мониторинга и связи в энергетике. *Гречихин В. А., Замолотчиков В. Н., Смольский С. М.* (на английском языке) 3

Системы передачи и обработки сигналов

Хаотическое маскирование информационных сигналов с использованием генератора на базе системы Лю. *Иванюк П. В., Политанский Л. Ф., Политанский Р. Л., Элияшиев О. М.* 11

Сенсоэлектроника

Компьютерная обработка изображений, полученных при помощи сенсора на базе гетероперехода CdS–Cu₂S. *Борщак В. А.* 18

Функциональная микро- и наноэлектроника

Температурные поля в растущем кристалле «солнечного кремния». *Кондрик А. И., Даценко О. А., Ковтун Г. П.* 21
Исследование импульсных характеристик ограничителей напряжения. *Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Рахматов А. З., Скорняков С. Л., Петров Д. А., Абдулхаев О. А.* 26

Технологические процессы и оборудование

Метод оценки качества тонкопленочной платы. *Спирин В. Г.* 31

Материалы электроники

Наноккомпозиты на основе опаловых матриц с кристаллическими ферротороидальными мультиферроиками. *Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В., Белянин А. Ф., Нужный Д., Кемпа М., Цветков М. Ю., Клещева С. М.* 35
Влияние толщины и температуры пленок фталоцианина меди на их свойства. *Алиева Х. С.* 42
Механизм формирования межслоевых квантовых нитей в легированном цинком Bi₂Te₃. *Алиева А. П., Алескерев Ф. К., Кахраманов С. Ш., Насибова С. А., Моройдор Е. Д., Пишкин М.* 46

Обеспечение тепловых режимов

Экспериментальное исследование энергетических характеристик проницаемого термоэлемента. *Черкез Р. Г., Демьянюк Д. Д.* 49

Список рецензентов номера

52

Новые книги

10, 17, 45

В портфеле редакции

25

ЗМІСТ

Технічна політика

Застосування бездротових систем моніторингу та зв'язку в енергетиці. *Гречихин В. А., Замолодчиков В. Н., Смольський С. М.* (3)

Системи передачі та обробки сигналів

Хаотичне маскування інформаційних сигналів з використанням генератора на базі системи Лю. *Іваньчук П. В., Політанський Л. Ф., Політанський Р. Л.* (11)

Сенсоелектроніка

Комп'ютерна обробка зображень, отриманих за допомогою сенсора на базі гетеропереходу CdS — Cu₂S. *Борщак В. А.* (18)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Температурні поля в кристалі «сонячного кремнію», що росте. *Кондрік А. І., Даценко О. А., Ковтун Г. П.* (21)

Дослідження імпульсних характеристик обмежувачів напруги. *Карімов А. В., Йодгорова Д. М., Рахматов А. З., Скорняков С. Л., Петров Д. А., Абдулхаєв О. А.* (26)

Технологічні процеси та обладнання

Метод оцінки якості тонкоплівкової плати. *Спірін В. Г.* (31)

Матеріали електроніки

Наноккомпозити на основі опалових матриць з кристалічними ферротороїдальними мультиферроїками. *Самойлович М. І., Ринкевич А. Б., Бовтун В., Беянин О. Ф., Нужний Д., Кемпа М., Цвєтков М. Ю., Клєщева С. М.* (35)

Вплив товщини та температури плівок фталоціаніну міді на їх властивості. *Алієва Х. С.* (42)

Механізм формування міжшарових квантових ниток в легованому цинком Bi₂Te₃. *Алієва А. П., Алєскєров Ф. К., Кахрєманов С. Ш., Насібова С. А., Моройдор Є. Д., Пішкін М.* (46)

Забезпечення теплових режимів

Експериментальне дослідження енергетичних характеристик проникного термоелемента. *Черкез Р. Г., Дем'янюк Д. Д.* (49)

CONTENTS

Technical policy

Application of wireless monitoring and communication systems in the power engineering. *Grechikhin V. A., Zamolodchikov V. N., Smolskiy S. M.* (3)

Systems of signals transfer and processing

Chaotic masking of information signals using generator based on the Liu system. *Ivanyuk P. V., Politansky L. F., Politansky R. L.* (11)

Sensoelectronics

Computer processing of the images obtained by a sensor based on the CdS — Cu₂S heterojunction. *Borschak V. A.* (18)

Functional micro- and nanoelectronics

Temperature fields in a growing solar silicon crystal. *Kondrik A. I., Datsenko O. A., Kovtun G. P.* (21)

Investigation of pulsed voltage limiters characteristics. *Karimov A. V., Yodgorova D. M., Rakhmatov A. Z., Skorniyakov S. L., Petrov D. A., Abdulkhayev O. A.* (26)

Technological processes and equipment

Method for evaluating the quality of thin-film board. *Spirin V. G.* (31)

Materials of electronics

Nanocomposites based on opal matrices with crystalline multiferroics of ferrothorite type. *Samoylovich M. I., Rinkevich A. B., Bovtun V., Belyanin A. F., Nuzhnyy D., Kempa M., Tsvetkov M., Klesheva S. M.* (35)

Effect of thickness and temperature of copper phthalocyanine films on their properties. *Alieva Kh. S.* (42)

The mechanism of formation of the interlayer quantum wires in zinc-doped Bi₂Te₃. *Alieva A. P., Aleskerov F. K., Kakhramanov S. Sh., Nasibova S. A., Moroidor E. D., Pishkin M.* (46)

Ensuring of thermal modes

Experimental research of the energy characteristics of a permeable thermoelement. *Cherkez R. G., Demianiuk D. D.* (49)

UDC 621.37:621.311

*Ph. D. (Techn.) V. A. GRECHIKHIN, Ph. D. (Techn.) V. N. ZAMOLODCHIKOV,
Dr. Sci. (Techn.) S. M. SMOLSKIY*

Russia, Moscow, National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
E-mail: smolskiysm@mail.ru

APPLICATION OF WIRELESS MONITORING AND COMMUNICATION SYSTEMS IN THE POWER ENGINEERING

The article describes some achievements of modern radio electronics, which prove a huge potential of modern wireless engineering for using in the fuel-energy complex. Wireless corporation communication systems, application of short-range radar measuring systems on the power engineering objects, prospects of laser measuring systems, methods of radio thermography and radio spectroscopy, wireless acoustic-electronic sensors are discussed.

Keywords: radio communication, wireless sensors, short-range radar, laser measuring systems, radio thermography, radio spectrometry, acoustical sensors.

At present, our world goes through the period of the impetuous scientific-technology revolution, which can be called “wireless revolution”. Now the radio signal plays a significant role not only in radio and TV broadcasting but in various scientific researches, in industry and in private life. The complex radio engineering devices have fixedly entered into everyday life: cellular phones-communicators, wireless phones, satellite and cable TV systems, the mobile Internet, smart cards etc. The radio engineering systems for guarding and warning are installed not only on guarded objects but also in private houses. Motor cars are equipped with complicated systems of guarding and radio navigation. Radio-frequency identification sensors are not only used in logistics but in miniature variants are even used as implants for domestic animals. There are stupendous achievements in creation and development of modern communication systems intended for transmission and reception of both speech signals and digital data.

It is natural that at this level of distribution of radio electronic devices the environment is saturated with the huge quantities of radio signals. These signals coexistence without creation of interference becomes more and more complicated. Problems of ecology arise more sharply as well. Up to now, the problems of electromagnetic compatibility of radio electronic equipment of different destination are nor solved, nither is the problem

of electromagnetic radiation influence of different nature on the human organism. So, for instance, the authors of [1] make a conclusion that the development of microwave communication systems in the near future may cause the appearance of a new sub-field in ecology — electromagnetic (micro-wave) ecology.

It is clear that during such a scientific-technological revolution it is impossible to pass over the areas of power engineering traditional for our country, especially under conditions of the critical situation existing during last decades in connection with renovation of strategic power engineering equipment. It is unlikely that the simple doubling of the operating equipment is the best way to solve the problem of industry renovation now when new scientific, manufacturing and technological possibilities promise serious hitch solutions for reconstruction of obsolete equipment or construction of new objects. The experience of the last decades shows that the simple purchasing of western control and monitoring equipment oriented to another conditions and systems will hardly help us strategically. Our country should develop its own multifunctional systems for control and monitoring of the important objects, and it should be done by its own scientific and industrial forces. It is possible subject to close cooperation between scientists and industrial experts of different areas including specialists in wireless systems, i. e. in the field of radio electronics.

In the present paper an attempt has been made to substantiate the necessity and availability of joining efforts and experience of power engineering and radio electronics experts. For radio engineers of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI) publication of the brief review of their research and develop-

The authors wish to express their gratitude to their colleagues S.E. Bankov, E.A. Bogatyrev, V.A. Fedorov, V.A. Filatov, A.E. Khanamirov, I.V. Komarov, V.I. Pleshchev, B.S. Rinkevichus, N.N. Savkov, A.A. Shchukin, V.V. Stykov, A.V. Tolkachev, A.A. Trofileev, S.A. Zhgoon and to many other MPEI experts, who took part in the developments described in this article.

ment results oriented to the fuel-power complex means a possibility to describe in short the promising directions of such cooperation.

It is no secret that during the previous years our researchers and engineers in radio engineering field were investigating and developing unique systems mostly for the military-industrial complex. The process of implementation of radio engineering into the peaceful industries (including power engineering) was always slow and hesitating because radio engineering experts did not understand the needs of those industries and the achievements of radio engineering were not open to the power engineering experts. Now the situation is changing for the better and many achievements of radio engineering will be without fail needed by the powerful energetics.

Application of wireless communication systems in power engineering

Let us consider the opportunities of radio communication systems application in power engineering. From the point of view of the application scale, they can be divided into two large groups: global communication systems and systems of intra-object radio communication.

The global systems in the thermal power engineering complex can be built, as usual, using the communication satellites. But the fuel-power complex has the unique possibility to develop their own corporate communication networks since it has in its disposal an extremely branched network of electric transmission lines, oil and gas pipe lines. For instance, the application of ground wires with internal fiber-optical cables provides unique possibilities for creating cheap communication links belonging to the power engineering industry.

Global networks are used for telemetric information transmission from one object to another or to controlling centers, as well as official control and monitoring information transmission. So-called "dark fibers" (i.e. not used fibers) can be leased successfully and provide serious benefits (especially in the future, when the role of the information transmission will be even greater). It is very promising to use power engineering communication channels for the distant education (e. g., retraining of specialists, distant knowledge monitoring, distant operator training) or for monitoring of the operator's functional conditions.

Intra-station communication systems serve to organize both systems for personal speech communication and transmission channels for technological and control-monitoring information for the automated control system for technological process (ACSTP).

With transition of electric power usage to market principles the electric power consumption schedules (during 24 hours, a week and a month) have changed essentially, and now the consumption depends not only upon the manufacturer's needs but also upon the financial condition of the

enterprise. It is clear that this leads to sharply changing consumption schedules, which affects the reliability and amortization of power engineering equipment. In recent years the role of automatic control systems and automated systems for engineering diagnostics of equipment becomes very significant.

To optimize the operation mode of the modern power plants, the measurement of 3–4 thousand parameters is required, which cannot be ensured by the personnel and requires automatic methods. The modern ASCTP require a huge number of cables, and the complicated cabling essentially decreases the operation reliability and requires more expensive equipment. Evidently, it is impossible to create a reliable and effective ASCTP without systems of high-speed information transmission.

The relevant problem of effectiveness of power consumption can be also solved by the radio electronic facilities, e. g., those developed and marketed by the company «Schneider Electric» (Germany).

A wireless system of data transmission from power engineering objects was developed in MPEI [2–4]. The system has a possibility of rapid deployment and good noise-immunity. Earlier, a very simple and cheap radio system for single-direction low-speed transmission of alarm signals had been developed and a small consignment of such systems (50 complete sets) had shown good operation. After that, much more modern and complicated radio systems were developed for mobile diagnostic labs such as «Power-Microbus» and «Ecology-Microbus». These systems include three subsystems:

- gas analysis (for remote control of the gas composition, e. g., for ecology monitoring);
- electric energy quality check;
- heat control (measuring distributed heat fields and transmitting information through radio-modem communication line).

These subsystems are available in MPEI as working models.

Configuration of the developed systems implies a central post and a certain number of peripheral on-duty posts. The equipment of the central post is installed on a transport vehicle or permanently on the power engineering object while the equipment of the peripheral posts can be mobile and can be located where it is needed. Communication between the posts is realized through the wireless radio communication channel. The system is controlled by a PC program from the central post. The PC gathers all information and registers it in the database for the further analysis.

The result of our last development in this area is the distributed system for information transmission for spatially extended industrial objects, in particular for power engineering equipment such as turbines or boilers. Here a new engineering solution is of interest – combined application of local cable systems for data acquisition and storage

in the high-speed standard RS485 and wireless radio modem communication line.

At present, the first phase of development of the radio system for information acquisition for the system of automated working place of the steam-boiler operator is fulfilled. This system is intended for Co-Generation Electric Plant (**CGEP**) of MPEI. The information from sensors will be transmitted through the radio channel from CGEP of MPEI to the operator's screen. We assume that at successful development of this investigation its results may be needed on different CGEP and on different objects of industrial heat supply. Similar systems can be used as reserve systems with autonomous power supply, which should essentially increase the "survivability" of equipment in emergency situations or in case of cable damage.

A diagnostic wireless information-measuring complex for the express-inspection of parameters of thermal and nuclear power plants or other extended industrial objects has been developed. This complex provides a real time information transmission from sensors through the radio channel to the central operator post located at several hundred meters' distance. Here the information is processed and accumulated in the database with possibility of further display on a PC screen in tables, graphs and diagrams. Operation parameters of this system are regulated by the operator.

Of course, taking into consideration the rapid development of the element base for implementation of modern radio engineering equipment, the above-mentioned models require modernization. However, this circumstance is not a problem because our developers have all necessary information and fulfill the similar investigations for other industrial branches. Thus, for a long time we have been developing a specific miniature system meant for transmission through the radio channel of discrete information about the heat network condition in Moscow residential neighbourhoods for further data processing, which will make it possible to control the parameters of these networks. It should be noted that as more perfect methods of information processing appear and the element base gets renewed, the developers modernize this system and implement its new variants successfully into Moscow municipal services.

The modern microelectronic element base opens new opportunities for creation of miniature (from 10 to 100 cm³ in volume) measuring transducers with autonomous power supply and with transmission of measured parameters through radio communication channel, which allows to create extensive sensor networks at small expenses. In such measuring transducers we may use inexpensive (from 15 to 500 rubles or \$0,5 to \$12) micro-miniature (from 3 to 30 mm³ in volume) integrated measuring sensors with the digital output signal of such parameters as temperature, pressure,

moisture, illumination, acceleration and vibrations, as well as such electric quantities as voltage, current, power and frequency. Such sensors have high accuracy (0,3–3%) and small power consumption (about 0,3 mW in the active operation mode). They have a possibility to accumulate, process and transmit information by means of a micro-controller with an embedded or external radio modem.

At such power consumption and size, the sensors can be supplied with power from a small autonomous source, which allows to mount them easily on the equipment being operated since there is no need to construct power and communication lines and to operate during many months. A wireless measuring-information network for remote monitoring and remote control is built on the basis of measuring transducers. These devices can be successfully combined with control, energy saving and commercial accounting systems.

Let us discuss another series of developments, which was fulfilled with orientation to law-enforcement bodies, fire brigades, special groups for struggle against terrorism. These are radio-equipped protection helmets with internal non-visible antennas [5], which ensure reliable speech communication between subscribers. Taking into consideration the interest in the use of such systems of the service personnel of extended power engineering objects, the new variants of protection helmets were developed corresponding to the safety standards on power engineering objects.

Radar technology application in power engineering

With the help of radar technology we may solve many relevant problems in power engineering complexes [2, 6–9]. Let us consider a simple example.

In the operation process of a thermal power plant (**TPP**) water contaminated with mazut is generated. This water is accumulated in a reservoir, precipitated in it until the liquids are separated and then wasted. At that the water discharge should be interrupted before the mazut is wasted. In other words, the water level mustn't be allowed to fall below the minimal value. For this, we can use a supersonic sonar distance meter. In this case an ultrasonic radiator is placed on the bottom of the reservoir, the oscillations reflect from the surface of the water–mazut boundary and are received by the sonar. Then a measuring system determines the time of signal passage and, knowing its velocity, calculates the water layer thickness.

Such a sonar device was developed in MPEI [8] and it is able to measure the water layer thickness from several centimeters to several meters. Its cost at small-scale manufacture does not exceed \$200–\$250.

Supersonic sonar devices can be also used to measure levels of different technological liquids and paste-like products with the aim of automation

of technological process control and monitoring. In this case the sonar is located on the reservoir cap and the beam of acoustic waves is directed to the surface of the product. The distance to the surface is measured and the product level is calculated. Measured values can be transmitted via wires or through radio channel practically to any distance. The level measuring error does not exceed 1–2%.

Radar devices, in which the radio-frequency radiation is used, are more sophisticated. Their operation principle is the same as in supersonic devices, but the measuring error is less. At present, in oil tankers, in oil and gas industry, on TPP the foreign level meters made by KROHNE (Germany) and SAAB Electronics (Sweden) are widely used. In MPEI as part of the program «Conversion and High Technologies» a high-precision radar level meter has been developed. It is the radar of continuous wave radiation with frequency modulation of the probing signal. The high accuracy was obtained owing to the application of the original algorithm of radio signal processing. The measurement error of the developed level meter is much less than the measurement error of the level meter B-70 from German company KROHNE.

The precision radar level measurer for liquid products with measurement error of the order of 0,1–0,2 mm has been designed. There are no such devices neither in Russia nor in foreign countries. These devices can find an application at petrol stations, petrol storages, chemical industries. The mentioned accuracy allows to measure the amount of petrol in standard (3×3×6 meters) reservoirs with an error down to 0,9 litres. Other versions of radar level meters for liquid and friable products have been developed. These devices are now successfully used at power engineering enterprises.

At present, dynamic parameters measurement methods based on application of different types of sensors are used for vibration inspection, investigation and alignment of turbounits. However, when it is necessary to measure at large temperatures and large pressures, typical sensors become very unreliable. Moreover, it is very difficult to conduct measurements in hard-to-reach places, for example, it is difficult to measure ripples of steam pressure in the nozzle box or in the internal case of the turbine. It is often necessary to make a rapid analysis of shafting vibrations of a turbine (or a pump or other equipment with the rotating elements) using short visible parts of the shafts. Elements of valve boxes and throttles of regulating valves of power engineering aggregates are difficult to access for measurement of dynamic displacements.

Achievements of radar technology allow to suggest new methods and fulfill high-precision measurements of small displacements (down to several microns) or establish the connection between pressure ripples and displacements of the

sensitive element. It is especially important when measuring modes of powerful power engineering equipment (for instance, powerful turbine shaft beats) at typical pressure values (up to 240 atmospheres) and for strongly overheated steam (up to 400°C). One can reach it by usual methods only when using complicated cooling systems for the sensor.

A measuring device based of the precision radar level meter system allows to measure small displacements (several millimeters) with an error of several microns. Its application opens entirely new possibilities in diagnostics of steam turbines. A vibration meter and a steam pressure meter based on the measuring system of small displacements [6] have been developed.

The probing signal passes into the waveguide and is directed on the vibrating element of the turbine. The open end of the waveguide is located at the distance of 1–2 mm from the vibrating element, therefore the radiation area is very small. This increases the measurement accuracy and allows to measure vibration of any point of the surface. Since the waveguide can be bent in any manner, it can be located inside of the turbine case, which permits to measure continuously the vibrations of construction elements during the normal operation and to obtain the dynamic pattern, for example, of the shaft bending.

To determine the steam pressure, there is a membrane on the end of the waveguide, which bends under pressure. The value of the bend is proportional to the pressure and can be determined by radar meter of displacement. Thus, we can determine the steam pressure in any point inside the turbine case.

During development of the radar system of small displacements measuring the laboratory testing of the device model was conducted, which confirmed theoretical results and showed the device efficiency.

A series of portable devices for inspection of the gas contain (oxygen, carbon and nitrogen oxides, methane and other gases) has been developed. Both single-component and multi-component gas-analyzers have been created. The main feature of these devices is effective application of microprocessor engineering and smart signal processing allowing to take into account the change in temperature, pressure and moisture of environment and to compensate measurement results. Devices have high spark and explosion safety confirmed by official certificates. The good performance is achieved owing to original circuitry, technological and constructive solutions. The developed multi-component gas-analyzer with elements of artificial intellect has no (according to our information) analogues in the world [3].

Another interesting idea is related to results of almost thirty-years' investigations of ground and

water surfaces by radar technologies from the flying vehicles. Re-orientation of these researches to the civil applications allowed to create the unique multi-functional radar measuring system PULSAR [10, 11], which may be used rather widely. This complex has a portable small-power radar of millimeter wave range. Its distinguishing feature is the application of phase methods of signal processing. This radar was successfully used for remote diagnostic of structure and parameters of plasma jet at the jet engine output. It turned out that radar monitoring of powerful equipment condition, which may be executed around the clock, allows to discover the vibration deviations from the rated level and permits to estimate the main spectral components and their dependence upon temperature and steam pressure. This allows to fix the increased beats, which are extremely dangerous for the operating turbine. With the help of this device, the determination of the live-steam pipeline deterioration on a Moscow TPP was fulfilled remotely, as opposed to the commonly used method which requires the full shutoff of the boiler, during which a fragment of the pipeline is cut out and then again welded. The used remote inspection method is based on the obtaining of a «vibro-portrait» — investigation of vibration spectrum on the chosen part.

One of the very interesting and novel applications of PULSAR radar is concerned with its possibility to estimate remotely the functional condition of a human being and to register the exit of some medical parameters beyond the permissible boundaries, which may cause the person to estimate the situation wrongly and to make a wrong decision. It is clear that this permanent inspection is extremely important for operators of huge power units. The radar allows to inspect the state of the operator right at working place without attaching any sensors. It means that his movements will not be limited. The duration of inspection can be arbitrary — from several minutes for the express-analysis to the full working day for estimation of fatigability. The power of radiated signal is very low and therefore it will not harm the operator. The radar can be located in the standard case near the operator or even mounted in the chair back. After finishing the inspection defined by the program, the computer of the device decodes the data obtained and allows the conclusions about operator efficiency, about his reactions on the current or on specially arranged extreme test situations. The obtained data about each inspected operator can be transmitted through the usual communication channels (including radio channel) or through the Internet to the centralized databank. At present this device is actively used for investigation of higher nervous activity of a man and for pre-flight inspection of astronauts. This device was awarded by the medal of International Exhibition in Brussels in 1997. There is no analogue of this device in the world.

Application of lasers in power engineering

Laser measuring systems are widely used to execute non-contact measurements of dynamic parameters of machine units as well as liquid and gas flows. At present, such systems are widely used both in scientific experiments and in industrial technologies, including observation of power engineering equipment operation and environmental monitoring and diagnostics [12]. Parameters measured by these systems are the most significant features of operation of hydraulic units, steam and gas turbines. The measurement results can be used both for optimization of operation modes and for opportune revelation of dangerous aperiodicities.

These systems play an important role in solving the problem of ensuring trouble-free operation and ecological safety of power engineering objects, and in their operating efficiency increase. The advantage of laser measuring systems is the applicability of remote, non-contact measurements, which do not disturb the measurement medium.

Investigations and developments of fiber-optic velocity sensors for liquid and gas flows were being carried out in MPEI since 1990s. These developments were based on application of semiconductor lasers and new elements of fiber-optic technology [13], new digital methods of processing of interference and Doppler signals of laser information-measuring systems [14]. For Doppler signals, which are registered under conditions when the law of signal phase differs from the linear one (in two-phase flows, in hydrodynamic flows in the presence of the acoustic field etc.) the new parameters estimation algorithms has been developed and investigated. The software packages based on different mathematical models of Doppler signals [15] have been created for estimation of mean and instantaneous values of frequency using different methods (digital spectral analysis, Gilbert transformation, discrete counting, wavelet analysis).

The main distinction of developed algorithms is the possibility to obtain estimates of nonstationary (pulse) signal parameters in the presence of multiplicative noise. The estimable parameter is the instantaneous frequency of signals (measurement results are given in relative units — the ratio of measured frequency to signal sampling frequency).

The laser optical-electronic sensors and the hardware-software means for data input and processing developed in MPEI allow to register vibro-oscillation of the object surfaces as well as hydro-acoustic oscillations with amplitude of a few hundredths of a micrometer, and to investigate their character in applied shock mode [16–18]. In this case, the measuring volume may be of several tens of microns in size, which is essentially less than when using the radio frequency waves (measuring volume is a region of space, in which the information signal is formed as a result of interaction of probing radiation with the test object). It makes it possible to take measurements with high spatial resolution.

Applications of radio thermography and radio spectroscopy

The radar complex for detection of oil and other grease films as well as higher temperature flows and solid impurities on the surface of water bodies is an example of radio thermography method application. This radar is based on the same PULSAR device, which in this mode registers the power flow of intrinsic thermal radiation created by a physical or an engineering object or a living organism. Absence of the direct contact makes it considerably easier to create the temperature fields maps and to analyse their dynamics. It is possible to obtain not only surface but depth thermograms. It might be useful, for instance, in the research of the Earth surface from the outer space. After modernization this method can be used for the search of survivors inside collapsed buildings.

The following interesting project [19, 20] demonstrates the application of radio spectroscopy methods.

In the process of electric and heat energy production based on the fuel burning, the energy efficiency and the ecological compatibility of the process essentially depend on the mode and operability of the burning system. The presence of excess concentration of nitric, carbon and sulfur oxides, benzopirren and other harmful admixtures in the effluent gas indicates nonoptimal operation of equipment and leads to environment pollution. Since there are no simple and reliable admixture inspection devices, based on traditional methods of inspection, it is impossible to fulfill the dispatching control of the burning modes.

In the offered project the radio spectroscopy approach based on resonant interaction between electromagnetic field and gaseous mediums is used. Since to each gas corresponds its own resonant absorption frequency (determined in microwave radio range), we can determine the concentration of particular gases probing the effluent gas. This system of radio spectroscopic investigation of effluent gases is a high-speed system and can perform automatic dispatching control of the burning modes.

Applications of acoustic electronics in power engineering

Investigations being conducted in MPEI on the wireless piezo-sensors for power engineering are very promising. These sensors are based on the use of surface acoustic waves.

The operating principle of acoustic-electronic sensors is based on the fact that external factors cause static deformations, which may be considered as parametric variation in elastic medium and the acoustic-electronic sensors geometry itself for acoustical waves of small amplitude. Variations in parameters and geometry cause variations in elastic (acoustic) wave velocity, which can be measured. Such sensors are already used in various equipment for pressure and mechanical deformation measurements.

On the basis of the principles described above, sensors of rotational moment for shafts of equipment for a wide variety of applications are produced [15]. Similar sensors are widely used in industrial equipment including power engineering equipment.

The sensors of electric and magnetic fields intensity are of interest for electrical power engineering. Owing to piezo-effect, the external electric field causes internal mechanical stresses in the acoustic duct, which leads to variation in acoustic wave velocity.

Remote surface acoustic waves sensors are used for continuous inspection of temperature of lightning arresters on transformer stations in the electric supply networks of high voltage. The pair of such sensors is located on the arrester and registering equipment is mounted in the distance of several meters from the arrester.

Power source charge/discharge automatic control

While developing modern autonomous power sources, electrochemical generators, energy accumulators for hydrogen power engineering devices, it is necessary to take into consideration that a series of electric parameters must be controlled and variety of contradictory factors must be allowed for, in order to maintain optimal and safe operating mode of charge and discharge. In this respect, the modern microelectronics and micro-mechanics achievements, new measuring sensors and micro-controllers with different channels of data transmission open qualitatively new opportunities for parameter measurement (with interference filtering) and application of optimal control theory algorithms and precise regulation with minimal transients, possibilities of remote control and event history saving. Thus, in cooperation with chemical experts the MITEK device has been developed. The device generates current of 1–100 A in the electrochemical cell with possibility of accurate measurement of polarization curves and optimal current maintenance in the electrochemical cell. This device was highly appreciated by experts and was more than once demonstrated at international exhibitions.

Resume

Evidently, it is impossible to describe all projects and ideas offered for development in one short paper. But even the developments described above prove the huge potential of modern wireless engineering and achievements of radio electronics in the fuel-energy complex.

REFERENCES

1. Баранов Н.Н., Климовский И.И. Электрофизические, медико-биологические и экологические проблемы сотовой связи в России. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2008. [Baranov N.N., Klimovskii I.I. Elektrofizicheskie, medikobiologicheskie i ekologicheskie problemy sотовой svyazi v Rossii. Moscow: Izdatel'skii dom MEI, 2008]
2. Богатырев Е.А., Воронов В.Н., Смольский С.М. и др. Информационно-измерительный комплекс для оператив-

ного экспресс-контроля параметров ТЭС и АЭС // Сб. тезисов докл. Электронной конфер. по итогам НИР в рамках НТП «Топливо и Энергетика». — Россия, г. Москва: МЭИ, 2002. — С. 120—125. [Bogatyrev E.A., Voronov V.N., Smol'skii S.M. i dr. Informatsionno-izmeritel'nyi kompleks dlya operativnogo ekspress-kontrolya parametrov TES i AES // Sb. tezisev dokl. Elektronnoi konfer. po itogam NIR v ramkakh NTP «Toplivo i Energetika». Rossiya, Moscow: MEI, 2002. P. 120]

3. Богатырев Е.А., Смольский С.М., Щукин А.В. и др. Опыт разработки мобильных информационно-измерительных комплексов для дистанционного мониторинга сложных промышленных объектов // Программа конфер. «Современная радиоэлектроника в ретроспективе идей В.А.Котельникова» с тезисами докладов. — Россия, г. Москва: МЭИ, 2003. — С.110. [Bogatyrev E.A., Smol'skii S.M., Shchukin A.V. i dr. Opyt razrabotki mobil'nykh informatsionno-izmeritel'nykh kompleksov dlya distantsionnogo monitoringa slozhnykh promyshlennykh obektov // Programma konfer. «Sovremennaya radioelektronika v retrospektive idei V.A.Kotel'nikova» s tezisami dokladov. Rossiya, Moscow: MEI, 2003. SP.110]

4. Богатырев Е.А., Воронов В.Н., Смольский С.М. и др. Измерительно-информационные радиокомплексы для энергетических объектов // Вестник МЭИ. — 2004. — Вып. 2. — С.132—136. [Bogatyrev E.A., Voronov V.N., Smol'skii S.M. i dr. // Vestnik MEI. 2004. Iss. 2. P.132]

5. Патент РФ № 2064770. Защитная радиофицированная каска // А.А.Трофилеев, Н.Н.Савков. — 1996. — Бюл. № 22. (Приоритет от 20.04.1993) [Patent RF № 2064770.Z / A.A.Trofileev, N.N.Savkov. 1996. Bull. N 22. (Prioritet ot 20.04.1993)]

6. Комаров И.В., Смольский С.М., Куменко А.И., Плещеев В.И. Измерения динамических параметров паровых турбин на основе радиолокационных методов // Тр. 2-го Междунар. симпоз. по энергетике, окружающей среде и экономике. Т. 1. — Россия, г. Казань. — 1998. — С.163—165. [Komarov I.V., Smol'skii S.M., Kumenko A.I., Pleshcheev V.I. Izmereniya dinamicheskikh parametrov parovykh turbin na osnove radiolokatsionnykh metodov // Tr. 2-go Mezhdunar. simpoz. po energetike, okruzhayushchei srede i ekonomike. T. 1. Rossiya, Kazan'. 1998. P.163]

7. Komarov I.V., Smolskiy S.M., Kumenko A.I., Pleshcheev V.I. FM low-range radar — vibrations and pressure meter // Proc.of the 3rd Int. Sympos. Proc. SIBCONVERS'99. Vol. 2. — Russia, Tomsk. — 1999. — P. 395—396.

8. Komarov I.V., Smolskiy S.M. C.M. FM low-range radar — from systems of weapon to precision distance meter // The Third Int. Sympos. Proc. SIBCONVERS'99. Vol. 2. — Russia, Tomsk. — 1999. — P.392—394.

9. Komarov I.V., Smolskiy S.M. From weapon systems to precision measuring systems of small distances (Researchers of FM radar devices on Department of Radio Receivers of MPEI. // Proc. of Intern Conf. "Modern Radio Engineering in retrospective of Kotel'nikov ideas". — Russia, Moscow: MPEI Publishing House, 2003. — P. 90—92.

10. Fedorov V.A., Mizirin A.V., Smolskiy S.M. et al. The microwave sensor of small moving for the active control of vibrations and chaotic oscillations modes // Proc.of the 7th International Conference on Vibrations «ICOVP-2005». — Turkey, Istanbul: ISIC University, 2005. — P.193—202.

11. Fedorov V.A. Radio-engineering methods in functional diagnostics of the person (in Russian): Textbook for students / Under edition of S.M. Smolskiy. — Moscow: MPEI Publishing House, 2008.

12. Ринкевичюс Б.С. Современные лазерно-компьютерные методы диагностики газовых потоков // Тр. Между-

нар. конф. «Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений». — Россия, Московская обл., г. Жуковский сентябрь. — 2004. — С. 38—40 [Rinkevichyus B.S. Sovremennye lazerno-komp'yuternye metody diagnostiki gazovykh potokov // Tr. Mezhdunar. konf. «Fundamental'nye problemy vysokoskorostnykh techenii». Russia, Moscow region, Zhukovskii sentyabr'. 2004. P. 38]

13. Евтихьева О.А., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В. Волоконно-оптические лазерные системы для диагностики потоков жидкости и газа // Сб. трудов Междунар. науч. кофер. «Математическое моделирование в технике и технологиях — ММТТ-2000». Т. 7. — Россия, г. Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ), 2000. — С. 92—93. [Evtikhieva O.A., Rinkevichyus B.S., Tolkachev A.V. Volokonno-opticheskie lazernye sistemy dlya diagnostiki potokov zhidkosti i gaza // Sb. trudov Mezhdunar. nauch. kofer. «Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike i tekhnologiyakh — ММТТ-2000». Vol. 7. Russia, St-Petersburg: SPbGTI(TU), 2000. P. 92]

14. Гречихин В.А. Анализ компьютерных алгоритмов обработки сигналов ЛДА // Тезисы докл. III Межгос. НТК «Оптические методы исследования потоков». — Россия, г. Москва: МЭИ, 1995. — С. 23—25 [Grechikhin V.A. Analiz komp'yuternykh algoritmov obrabotki signalov LDA // Tezisy dokl. III Mezghos. NTK «Opticheskie metody issledovaniya potokov». Russia, Moscow: MEI, 1995. P. 23]

15. Штейнберг О.М., Швецов А.С., Жгун С.А., Лобов Г.Д. Повышение чувствительности и точности измерителя крутящего момента вращающегося вала с электромагнитной связью с датчиком на ПАВ // Метрология. Прил. к журналу «Измерительная техника». — 2007. — № 12. — С. 15—25. [Shteinberg O.M., Shvetsov A.S., Zhgun S.A., Lobov G.D. / Metrologiya. Pril. k zhurnalu «Izmeritel'naya tekhnika». 2007. N 12. P. 15]

16. Гречихин В.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С. Влияние акустооптического эффекта на погрешность измерений колебательной скорости частиц лазерным доплеровским анемометром // Автометрия. — 2000. — №5. — С. 92—101. [Grechikhin V.A., Raskovskaya I.L., Rinkevichyus B.S. // Avtometriya. 2000. N 5. P. 92]

17. Гречихин В.А., Толкачев А.В. Оценка амплитуды гидроакустических колебаний с использованием ЛДВ // Тр 9-й Междунар. НТК «Оптические методы исследования потоков». — Россия, г. Москва: Издательский дом МЭИ, 2007. — С. 226—229. [Grechikhin V.A., Tolkachev A.V. Otsenka amplitudy gidroakusticheskikh kolebanii s ispol'zovaniem LDV // Tr 9-i Mezhdunar. NTK «Opticheskie metody issledovaniya potokov». Russia, Moscow: Izdatel'skii dom MEI, 2007. P. 226]

18. Гречихин В.А., Макшанов О.В. Сравнительный анализ алгоритмов обработки сигнала лазерного доплеровского виброметра // Тезисы докл. МНТК «К столетию со дня рождения В.А.Котельникова». — Россия, г. Москва: Издательский дом МЭИ, 2008. — С. 20—21. [Grechikhin V.A., Makshanov O.V. Sravnitel'nyi analiz algoritmov obrabotki signala lazernogo doplerovskogo vibrometra // Tezisy dokl. MNTK «K stoletiyu so dnya rozhdeniya V.A.Kotel'nikova». Russia, Moscow: Izdatel'skii dom MEI, 2008. P. 20]

19. Гусев В.В., Иванова Е.П., Ханамиров А.Е. и др. Радиоспектроскопия и контроль газов ТЭС // Сб. докл. XI Междунар. конфер. по спиновой электронике и гиродинамической электродинамике. — Россия, г. Москва: Изд. УНЦ-1 МЭИ (ТУ), 2002. — С. 477—486. [Gusev V.V., Ivanova E.P., Khanamirov A.E. i dr. Radiospektroskopiya i kontrol' gazov TES // Sb. dokl. KhI Mezhdunar. konfer. po spinovoi

elektronike i girovektornoj elektrodinamike. Russia, Moscow: Izd. UNTs-1 MEI (TU), 2002. P. 477]

20. Иванова Е.П., Смольский С.М., Ханамиров А.Е., Хрюнов А.В. О радиоволновом контроле в тракте газового выброса ТЭС // Вестник МЭИ. — 2004. — №1. — С. 64–69. [Ivanova E.P., Smol'skii S.M., Khanamirov A.E., Khryunov A.V. O radiovolnovom kontrole v trakte gazovogo vybrosa TES // Vestnik MEI. 2004. N1. P. 64]

Received 26.03 2011

Гречихин В. А., Замолотчиков В. Н., Смольский С. М. **Применение беспроводных систем мониторинга и связи в энергетике.**

Ключевые слова: радиосвязь, беспроводные датчики, РЛС ближнего действия, лазерные измерительные системы, радиотермография, радиоспектрометрия, акустические датчики.

Описаны некоторые достижения современной радиоэлектроники, которые свидетельствуют о громадном потенциале современной беспроводной техники и достижений радиоэлектроники для использования в топливно-энергетическом комплексе. Рассмотрены беспроводные корпоративные системы связи, вопросы применения на энергетических объектах измерительных систем ближней радиолокации,

перспективы использования лазерных измерительных систем, методы радиотермографии и радиоспектроскопии, возможности беспроводных акустоэлектронных датчиков.

Россия, Москва, Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт".

Гречихин В. А., Замолотчиков В. Н., Смольский С. М. **Застосування бездротових систем моніторингу та зв'язку в енергетиці.**

Ключові слова: радіозв'язок, бездротові датчики, РЛС ближньої дії, лазерні вимірювальні системи, радіотермографія, радіоспектрометрія, акустичні датчики.

Описано деякі досягнення сучасної радіоелектроніки, які свідчать про величезний потенціал сучасної бездротової техніки та досягнень радіоелектроніки для використання у паливно-енергетичному комплексі. Розглянуто бездротові корпоративні системи зв'язку, питання застосування на енергетичних об'єктах вимірювальних систем ближньої радіолокації, перспективи використання лазерних вимірювальних систем, методи радіотермографії та радіоспектроскопії, можливості бездротових акустоелектронних датчиків.

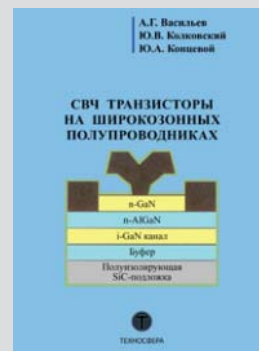
Росія, Москва, Національний дослідницький університет "Московський енергетичний інститут".

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Васильев А. Г. и др. СВЧ-транзисторы на широкозонных полупроводниках.— Москва: Техносфера, 2011.— 456 с.

Книга представляет собой учебное пособие по физическим основам и технологии создания транзисторов на широкозонных полупроводниках. Рассмотрены свойства двумерного электронного газа и физика гетеропереходов, в основном типа AlGaIn/GaN. Дан обзор структур транзисторов на основе широкозонного полупроводника GaN. Рассмотрены структуры транзисторов на алмазе и карбиде кремния. Рассмотрены свойства подложек из сапфира, карбида кремния и других материалов, применяющихся для создания гетероструктур. Детально проанализированы методы изготовления гетеропереходов при использовании эпитаксии из металлоорганических соединений и молекулярно-лучевой эпитаксии. Рассмотрены требования к омическим контактам и барьерам Шоттки, при использовании которых создаются гетероэпитаксиальные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов в канале (HEMT). Рассмотрена технология транзисторов на алмазе. Дан детальный обзор методов контроля технологических процессов, применяющихся при изготовлении транзисторов. Рассмотрены методы измерения основных параметров СВЧ-транзисторов и методы контроля надежности транзисторов. Книга предназначена для студентов, обучающихся по профилю «Электроника и наноэлектроника». Книга будет полезна также магистрам, аспирантам, инженерам и научным работникам, специализирующимся в области разработки и применения изделий твердотельной электроники.



УДК 621.391.01

П. В. ИВАНЮК, д. ф.-м. н. Л. Ф. ПОЛИТАНСКИЙ, к. ф.-м. н. Р. Л. ПОЛИТАНСКИЙ,
О. М. ЭЛИЯШИВ

Украина, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

E-mail: ivanyukpetro@ukr.net

ХАОТИЧЕСКОЕ МАСКИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТОРА НА БАЗЕ СИСТЕМЫ ЛЮ

В работе рассчитан спектр показателей Ляпунова для хаотической системы Лю. Показана возможность установки режима синхронизации между генераторами, основанными на исследованной системе. Экспериментально реализована система передачи информации с использованием генераторов хаотических колебаний.

Ключевые слова: хаос, гиперхаос, хаотическое маскирование, хаотическая синхронизация, система Лю, спектр показателей Ляпунова.

Детерминированный хаос применяется в различных отраслях инженерии, в частности в телекоммуникационных системах, базирующихся на этом явлении. Примерами динамических систем с хаотическим поведением могут служить системы Лоренца, Спротта, Ресслера и др. В последние годы были разработаны новые системы, которые при определенных условиях генерируют хаотические и гиперхаотические колебания. В частности, это системы Лю (Liu System) [1, 2] и Чена (Chen's model) [3], являющиеся модификациями системы Лоренца.

Широкополосность, ортогональность, сложность структуры хаотических сигналов и сильная чувствительность к начальным условиям обуславливают перспективность их использования в системах связи для повышения криптоустойчивости. Это делает актуальным исследование их свойств, поиск путей аппаратной реализации генераторов хаотических колебаний и систем связи с их использованием.

Целью настоящей работы является определение значений параметров, при которых в хаотической системе Лю генерируются хаотические, гиперхаотические, квазипериодические и периодические колебания, а также экспериментальная реализация системы передачи информации с использованием схемотехнических решений генераторов хаотических колебаний и системы связи на их основе.

Математическая модель исследуемой системы

Гиперхаотическая система Лю описывается четырьмя нелинейными дифференциальными уравнениями первого порядка следующего вида [2]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y - x), & \dot{y} &= bx - hxz + \lambda w, \\ \dot{z} &= cx^2 - dz, & \dot{w} &= -ny, \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y, z, w и $a, b, h, \lambda, c, d, n$ — переменные и константы соответственно.

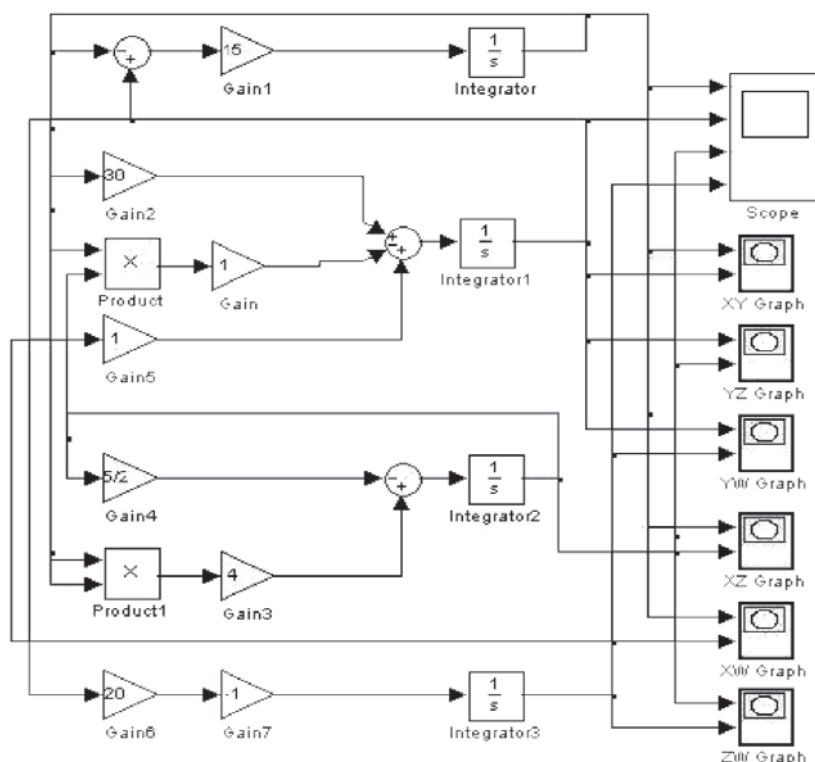


Рис. 1. Matlab-Simulink-модель генератора гиперхаотических колебаний

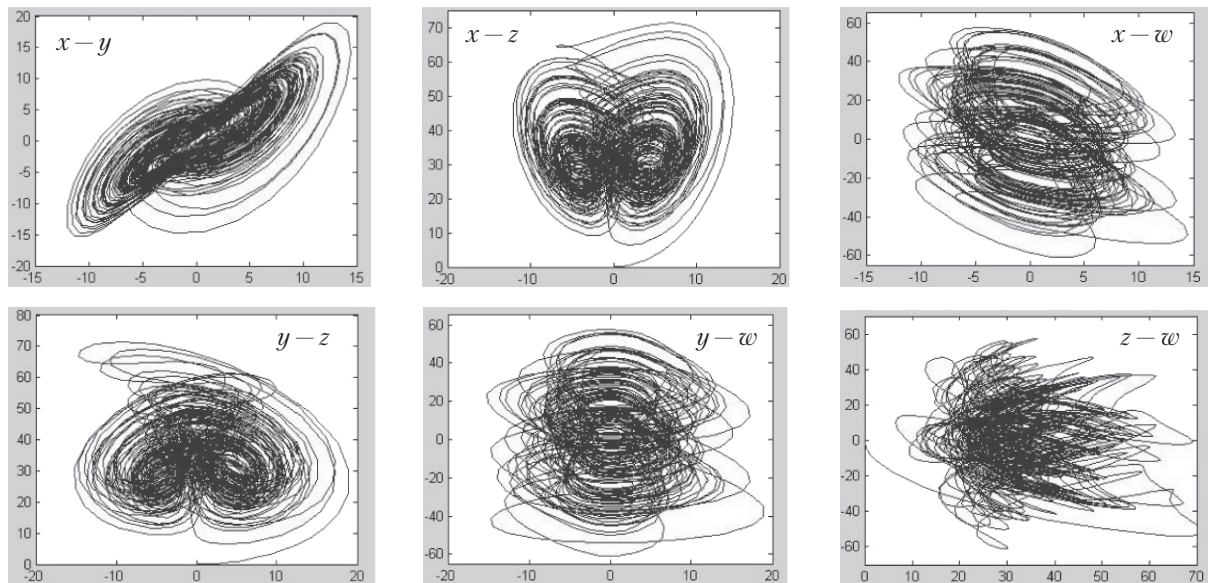


Рис. 2. Фазовые траектории системы в указанных на рисунках плоскостях

Для численного моделирования была разработана Matlab-Simulink-модель генератора гиперхаотических колебаний (рис. 1), состоящая из соединенных между собой блоков усиления, суммирования и вычитания, умножителей, интеграторов и устройств регистрации сигналов. Результаты моделирования системы при значениях параметров $a=15$, $b=30$, $h=1$, $\lambda=1$, $c=4$, $d=2,5$ приведены на рис. 2.

Определение спектра показателей Ляпунова

Существуют два подхода для описания хаотических сигналов [4, с. 26]. При первом считается, что процессы являются детерминированными, т. е. такими, которые реализуются с помощью определенного алгоритма, а их поведение во времени описывается соответствующими математическими выражениями с заданными начальными условиями. При этом определяются фрактальная размерность аттракторов и показатели Ляпунова, являющиеся характеристиками системы. При втором подходе предполагается, что сигнал является случайным и непредсказуемым во времени процессом. В ходе наблюдения за множеством реализаций такого процесса можно оценить некоторые статистические закономерности во временной структуре сигнала, описываемые корреляционной функцией, спектральной плотностью мощности, математическим ожиданием и дисперсией.

Определение спектра показателей Ляпунова дает возможность установить диапазон значений параметров системы, при которых возникают гиперхаотические, хаотические, квазипериодические и периодические колебания.

Показатели Ляпунова характеризуют степень зависимости системы от начальных условий и определяют скорость расхождения ее траекторий в фазовом пространстве. Существует не-

сколько алгоритмов определения показателей Ляпунова. Первый предусматривает отслеживание изменения во времени фазовых траекторий двух динамических систем с близкими начальными условиями. Согласно второму алгоритму необходимо решить систему уравнений динамики, которая описывает движение точки вдоль фазовой траектории, совместно с уравнениями в вариациях, описывающими эволюцию бесконечно малого возмущения этой траектории [5, с. 153]. Первый способ используют в случае невозможности численного решения уравнений в вариациях.

При определении нескольких показателей Ляпунова необходимо отслеживать эволюцию соответствующего количества векторов возмущения вдоль фазовой траектории сигнала. Для системы, описываемой уравнениями (1), это количество равняется четырем.

Показатели Ляпунова исследуемой системы рассчитывались с использованием алгоритма Беннеттина с модификациями [4, 5]. При этом осуществлялось одновременное решение системы дифференциальных уравнений (1) и четырех систем уравнений в вариациях, имеющих следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a(y_1 - x_1), \quad \dot{y}_1 = bx_1 - hzx_1 - h\lambda z_1 + \lambda w_1, \\ \dot{z}_1 &= 2cx_1 - dz_1, \quad \dot{w}_1 = -ny_1. \end{aligned} \quad (2)$$

Система из двадцати уравнений решалась численным методом Рунге – Кутты с перенормировкой и ортогонализацией векторов возмущения в процессе вычислений для указанных выше значений параметров a , b , h , λ , c , d . Для каждого значения параметра $n \in (1, 100]$ определялись показатели Ляпунова при нормировании на единицу начальных ортогональных векторов возмущения x_0 , y_0 , z_0 , w_0 . Расчет завершался орто-

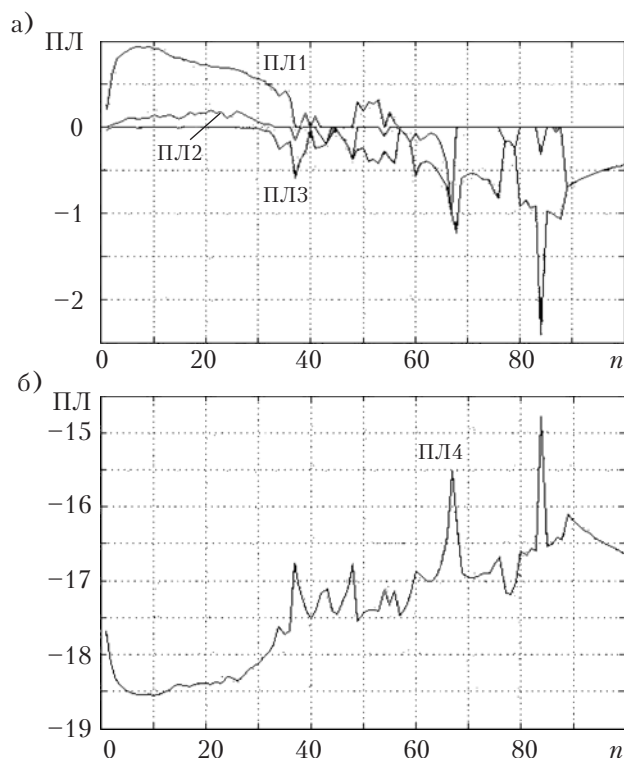


Рис. 3. Спектр показателей Ляпунова для системы уравнений (1):

а — первые три показателя; б — четвертый показатель

гонализацией и нормализацией на фиксированную константу векторов возмущения согласно методу Грамма—Шмидта [6]. Рассчитанный спектр показателей Ляпунова (ПЛ) приведен на рис. 3.

Как следует из рис. 3, б, четвертый ПЛ отрицателен для любого значения n . Его минимальное значение составляет $-18,58$ при $n=10$ и максимальное $-14,78$ при $n=84$.

Периодические колебания имеют место при отрицательных значениях трех показателей Ляпунова и равенстве нулю четвертого. При отрицательных значениях двух ПЛ и двух нулевых значениях наблюдаются квазипериодические колебания. Хаотические колебания имеют место при условии, что значение одного из ПЛ равно нулю, значения одного — положительное, а два остальных — отрицательные. Гиперхаотические колебания наблюдаются при двух положительных значениях показателя Ляпунова из четырех.

Из полученных результатов следует, что при значениях $n \in (0, 33]$ система имеет два положительных ПЛ, и, как следствие, в ней возникают гиперхаотические колебания. При значениях $n \in (38, 42]$ и $n \in (48, 57]$ система имеет один положительный ПЛ, т. е. в системе будут иметь место хаотические колебания. При значениях $n \in (42, 48]$, $(57, 68]$, $(76, 80]$, $(83, 100]$ системой генерируются периодические колебания. При значениях $n \in (68, 76]$, $(80, 83]$ имеют место квазипериодические колебания.

Синхронизация генераторов хаотических колебаний

Существует множество методов синхронизации хаотических систем — полная, обобщенная, фазовая, опережающая и др. [7]. Под полной синхронизацией понимают точное совпадение векторов состояний взаимодействующих между собой систем. Это возможно при идентичности их параметров.

Режим синхронизации двух идентичных хаотических систем Лю, функциональная схема которой приведена на рис. 4, обеспечивался путем установления между ними обратной линейной связи.

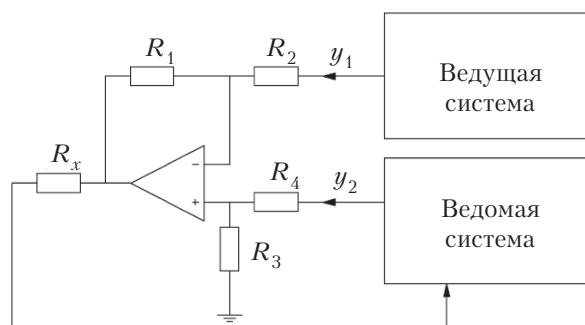


Рис. 4. Функциональная схема синхронизации двух хаотических систем линейной обратной связью (сопротивление резисторов $R_1 \dots R_4$ — 10 кОм)

Ведущую и ведомую системы Лю, можно описать системами линейных дифференциальных уравнений первого порядка следующего вида [8]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a(y_1 - x_1), \quad \dot{y}_1 = bx_1 - hx_1z_1 + \lambda w_1, \\ \dot{z}_1 &= cx_1^2 - dz_1, \quad \dot{w}_1 = -ny_1 \end{aligned} \quad (3)$$

и

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= a(y_2 - x_2), \\ \dot{y}_2 &= bx_1 - hx_2z_2 + \lambda w_2 + e(y_1 - y_2), \\ \dot{z}_2 &= cx_1^2 - dz_2, \\ \dot{w}_2 &= -ny_2, \end{aligned} \quad (4)$$

где $y_1 - y_2$ — погрешность синхронизации ведущей и ведомой систем.

Ведущая и ведомая системы формируют хаотические сигналы $x_1(t)$, $y_1(t)$, $z_1(t)$, $w_1(t)$ и $x_2(t)$, $y_2(t)$, $z_2(t)$, $w_2(t)$ соответственно. В качестве примера рассмотрим обеспечение процесса синхронизации сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ ведущей и ведомой систем.

Для моделирования процесса синхронизации ведущей и ведомой систем использовалась программная среда Micro-cap 9.

Глубина связи между системами регулируется изменением величины сопротивления R_x . Качественно о степени корреляции между сигналами $y_1(t)$ и $y_2(t)$ при разных значениях R_x можно

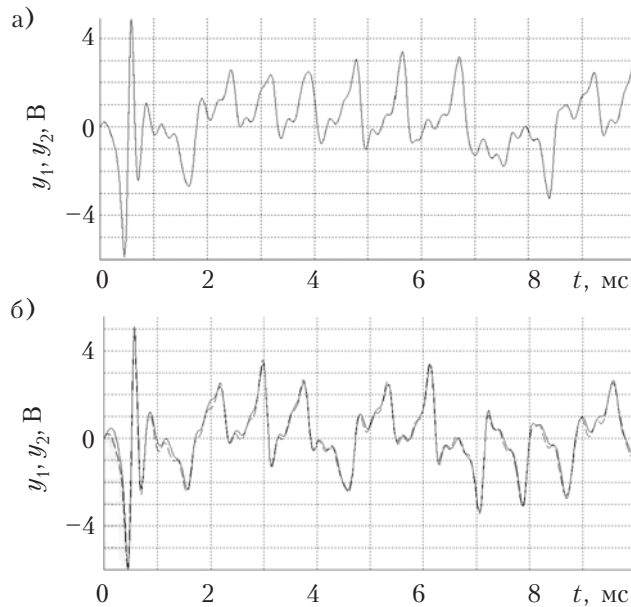


Рис. 5. Временные диаграммы хаотических сигналов y_1 и y_2 для исследуемой системы при значениях $R_x = 100$ Ом (а) и $R_x = 3$ кОм (б)

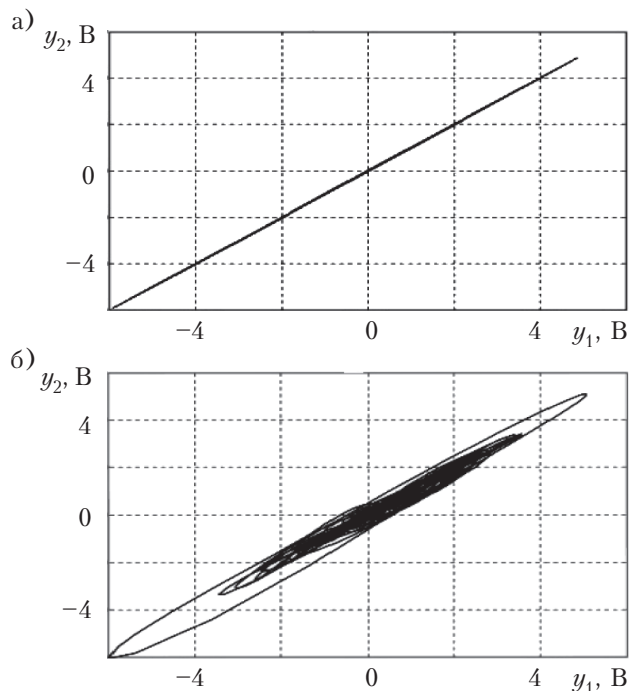


Рис. 6. Зависимость амплитуды сигнала y_2 от амплитуды сигнала y_1 для исследуемой системы при $R_x = 100$ Ом (а) и $R_x = 3$ кОм (б)

судить по их временным диаграммам, приведенным на **рис. 5**: при $R_x = 100$ Ом диаграммы идентичны, что указывает на синхронизацию ведущей и ведомой систем, в отличие от $R_x = 3$ кОм. Дальнейшее увеличение сопротивления R_x приводит к полной десинхронизации систем.

Наличие синхронизации исследуемых систем подтверждается зависимостями амплиту-

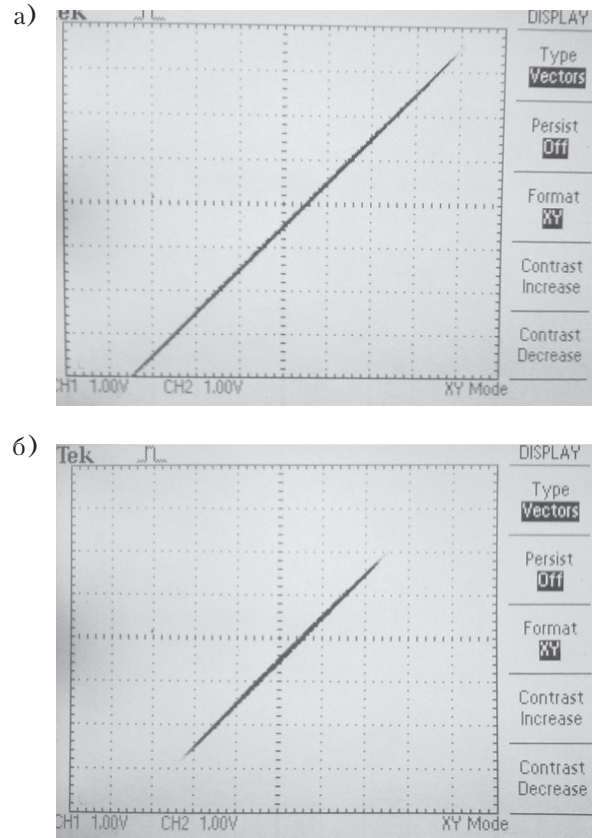


Рис. 7. Экспериментальные зависимости $x_2 = f(x_1)$ (а) и $y_2 = f(y_1)$ (б)

ды сигнала ведомой системы $y_2(t)$ от амплитуды сигнала $y_1(t)$ ведущей, которые приведены на **рис. 6, а**: при $R_x = 100$ Ом зависимость $y_2 = f(y_1)$ линейна с углом наклона $\varphi = \pi/4$, что указывает на идентичность сигналов. Увеличение сопротивления R_x до 3 кОм приводит к десинхронизации систем (рис. 6, б).

Из результатов экспериментальных исследований режима синхронизации ведущей и ведомой систем, приведенных на **рис. 7**, следует, что синхронизация сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$ (рис. 7, а) обеспечивается установлением синхронизации сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ (рис. 7, б).

Хаотическое маскирование

Хаотическое маскирование является одним из самых простых способов скрытой передачи информации [7, 9]. При хаотическом маскировании информационный сигнал аддитивно подмешивается к хаотическому сигналу в сумматоре на выходе ведущей системы, после чего результирующий сигнал передается по каналу связи. Синхронизация системы связи осуществляется установлением одинаковых динамических режимов работы приемной и передающей частей системы связи с помощью переданного и идентичного ему сигнала, сгенерированного приемной стороной. На приемной стороне происходит детектирова-

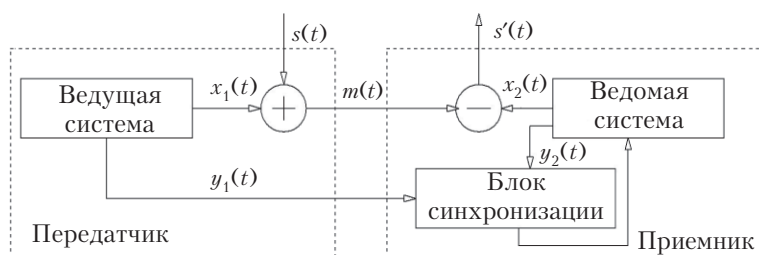


Рис. 8. Структурная схема передачи информации с хаотическим маскированием

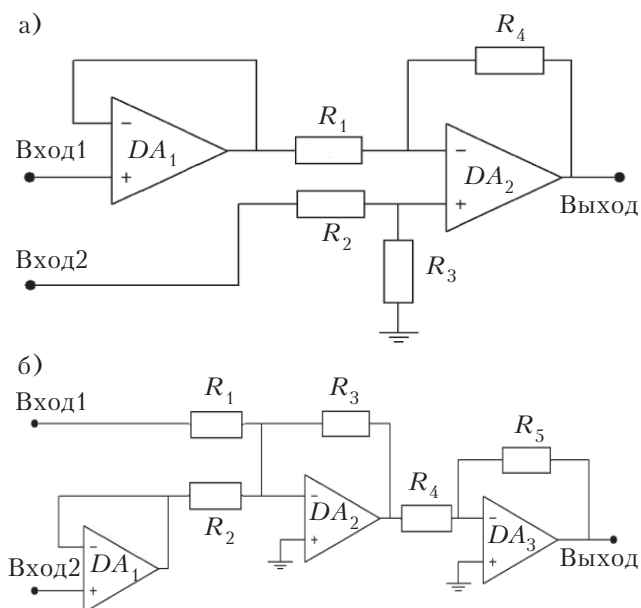


Рис. 9. Схемы вычитания (а) и суммирования (б) аналоговой информации (сопротивление резисторов $R_1 \dots R_4$ — 10 кОм)

ние информационного сигнала путем вычитания от принятого сигнала синхронного отклика.

На рис. 8 приведен возможный вариант структурной схемы передачи информации с хаотическим маскированием.

Моделирование работы системы передачи информации осуществлялось также в программной среде Micro-cap 9. Нелинейный передатчик системы состоит из генератора хаотических колебаний и блока суммирования сигналов, а приемник — из идентичного генератора и блока вычитания.

В качестве генератора хаотических колебаний в передатчике и приемнике использовалась система Лю, описываемая дифференциальными уравнениями (1). Экспериментально система передачи информации была реализована на операционных усилителях и аналоговых умножителях сигналов. В блоках суммирования и вычитания сигналов (рис. 9) первый операционный усилитель выполняет функцию буфера.

Генераторы хаотических колебаний в ведущей и ведомой системах формируют сигналы $x_1(t)$, $y_1(t)$, $z_1(t)$, $w_1(t)$ и $x_2(t)$, $y_2(t)$, $z_2(t)$, $w_2(t)$, обладающие свойствами хаотической динамики. Синхронизация сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$ системы обеспечивается путем установления синхронизации сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ с помощью схемы линейной обратной связи (см. рис. 4). Информационный сигнал $s(t)$, просуммированный с несущим хаотическим сигналом $x_1(t)$, передается по линии связи. В качестве информационного сигнала выбиралась синусоида с амплитудой 3 В и частотой 600 Гц. В приемной

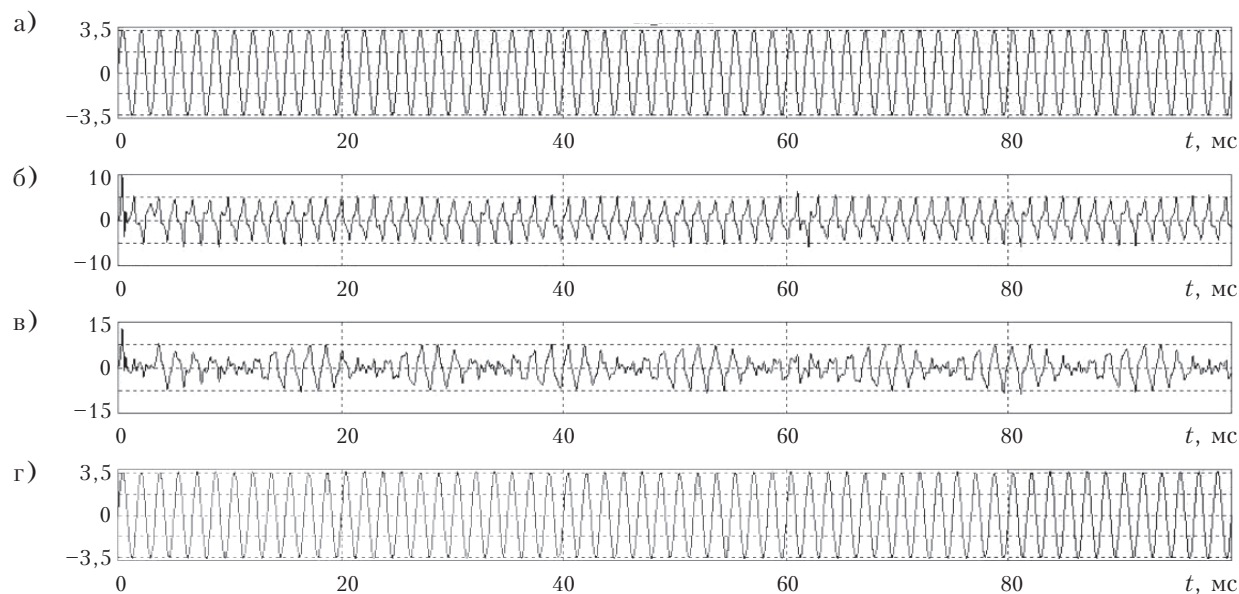


Рис. 10. Полученные в результате моделирования временные диаграммы амплитуды сигналов (в вольтах): а — входной информационный сигнал; б — хаотический сигнал; в — аддитивная смесь информационного и хаотического сигналов; г — выходной сигнал на приемной стороне системы

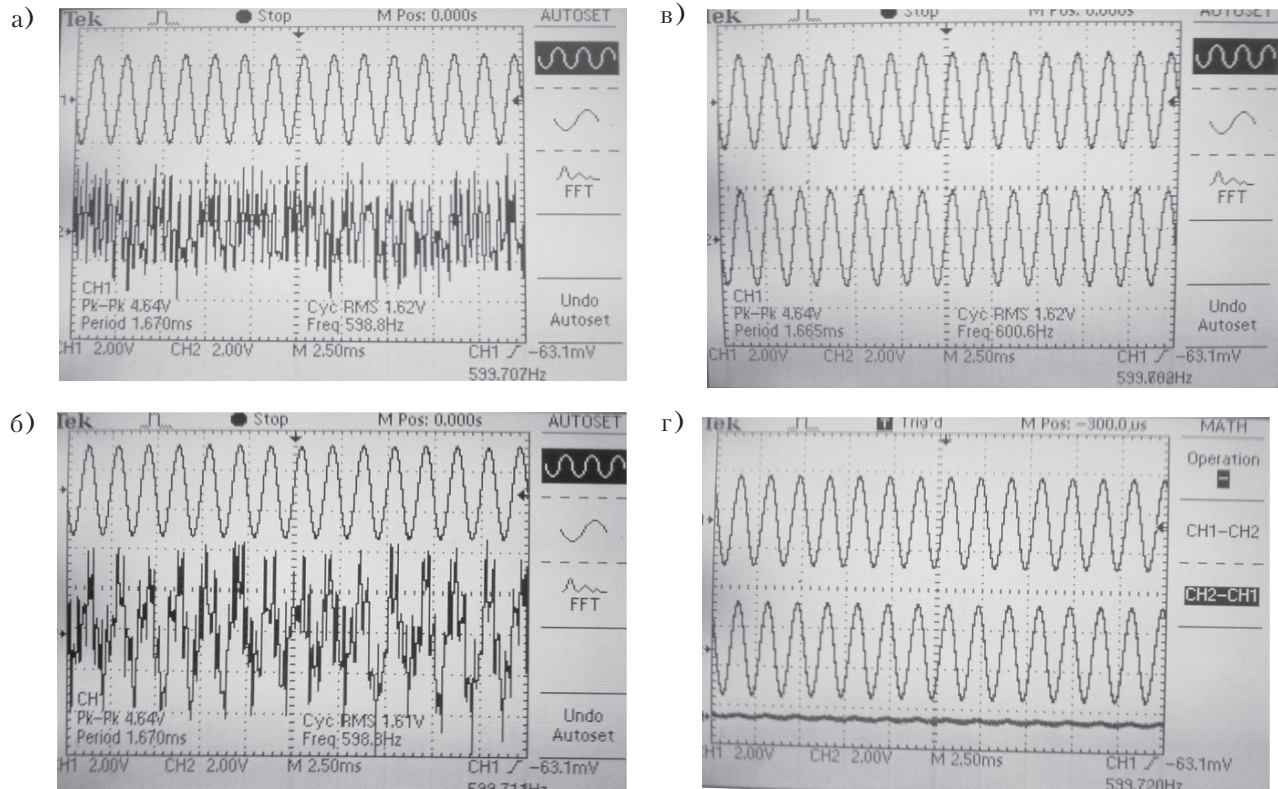


Рис. 11. Экспериментальные временные диаграммы сигналов:

a — входной информационный сигнал и хаотический сигнал; *б* — входной информационный сигнал и переданный по линии связи модулированный сигнал; *в* — информационный сигнал на входе и выходе системы; *г* — информационный сигнал на входе, выходе системы и разница между ними

части системы происходит вычитание от модулированного сигнала $m(t)$ хаотического сигнала $x_2(t)$, синхронизированного с $x_1(t)$, в результате чего получается выходной информационный сигнал. При моделировании предполагалось, что канал связи является идеальным.

Из полученных в результате моделирования временных диаграмм, приведенных на рис. 10, следует, что выходной сигнал на приемной стороне совпадает с входным информационным сигналом.

Результаты моделирования процесса передачи информации с хаотическим маскированием были подтверждены экспериментальными исследованиями, в которых использовался синусоидальный информационный сигнал частотой 600 Гц и амплитудой 1,6 В, формируемый генератором низкочастотных сигналов ГЗ-118. В качестве генератора хаотических колебаний использовался генератор, описываемый системой дифференциальных уравнений (1), свойства которого исследованы в [10].

Как следует из представленных на рис. 11 экспериментальных временных диаграмм, разница между полученным сигналом на приемной стороне системы связи и переданным информационным сигналом незначительна (рис. 11, г), что указывает на возможность использования

предложенной системы для передачи информации с хаотическим маскированием.

Проведенные исследования позволили реализовать на базе системы Лю генератор различных видов колебаний и синхронизировать два таких генератора с помощью линейной обратной связи, а также реализовать систему связи с использованием генераторов хаотических колебаний.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Wang Fa-Qiang, Liu Chong-Xin. Hyperchaos evolved from the Liu chaotic system // Chinese Physics. — 2006. — Vol. 15, N 5. — P. 963–968.
2. Luo Xiao-Hua, Luo Xiao-Hua et al. Circuitry implementation of a novel four-dimensional nonautonomous hyperchaotic Liu system and its experimental studies on synchronization control // Chinese Physics B. — 2009. — Vol. 18, N 6. — P. 2168–2175.
3. Jinhu Lu, Guanrong Chen, Suochun Zhang. The compound structure of a new chaotic attractor // Chaos, Solitons and Fractals. — 2002. — N 14. — P. 669–672.
4. Шахтарин Б. И., Кобылкина П. И., Сидоркина Ю. А. Генераторы хаотических колебаний: учебн. пособие. — Москва: Гелиос АРВ, 2007. [Shakhtarin B. I., Kobylkina P. I., Sidorkina Yu. A. Generatory khaoticheskikh kolebaniy: uchebn. posobie. Moscow: Gelios ARV, 2007]
5. Кузнецов С. П. Динамический хаос. — Москва: Изд-во Физматлит, 2001. [Kuznetsov S. P. Dinamicheskii khaos. Moscow: Izd-vo Fizmatlit, 2001]

6. Іванюк П. В., Політанський Р. Л. Розрахунок спектру показників Ляпунова для гіперхаотичних систем // Труды V Міжнар. конфер. CSE-2011 "Комп'ютерні науки та інженерія". — Україна, м. Львів. — 2011. — С. 254–255. [Ivanyuk P. V., Politsans'kii R. L. Rozrakhunok spektru pokaznikov Lyapunova dlya giperkhaotichnikh sistem // Trudi V Mizhnar. konfer. CSE-2011 "Komp'yuterni nauki ta inzheneriya". Ukraine, Lviv. 2011. P. 254]

7. Короновский А. А., Москаленко О. И., Храмов А. Е. О применении хаотической синхронизации для скрытной передачи информации // Успехи физических наук. — 2009. — Т. 179, № 12. — С. 1281–1310. [Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Khramov A. E. // Uspekhi fizicheskikh nauk. 2009. Vol. 179, N 12. P. 1281]

8. Іванюк П. В., Політанський Л. Ф., Політанський Р. Л. Синхронізація гіперхаотичних систем Лю оберненим лінійним зв'язком // МРФ'2011. Том 2. Междунар. конфер. «Телекоммуникационные системы и технологии». — Україна, г. Харків. — 2011. — С. 61–63. [Ivanyuk P. V., Politsans'kii L. F., Politsans'kii R. L. Sinkhronizatsiya giperkhaotichnikh sistem Lyu obrnenim liniinim zv'yazkom // MRF'2011. Tom 2. Mezhdunar. konfer. «Telekommunikatsionnye sistemy i tekhnologii». Ukraine, Kharkov. 2011. P. 61]

9. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. — Москва: Физматлит, 2002. [Dmitriev A. S., Panas A. I. Dinamicheskii khaos. Novye nositeli informatsii dlya sistem svyazi. Moscow: Fizmatlit, 2002]

10. Іванюк П. В., Політанський Л. Ф., Політанський Р. Л. Дослідження хаотичних процесів, генерованих системою Лю // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2011. — № 4/9 (52). — С. 11–15. [Ivanyuk P. V., Politsans'kii L. F., Politsans'kii R. L. // Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii. 2011. N 4/9 (52). P. 11]

Дата поступления рукописи
в редакцию 26.03 2012 г.

Ivanyuk P. V., Politsansky L. F., Politsansky R. L. **Chaotic masking of information signals using generator based on the Liu system.**

Keywords: chaos, hyperchaos, chaotic masking, chaotic synchronization, Liu system, Lyapunov exponent spectrum.

Lyapunov exponent spectrum for a chaotic Liu system was calculated in this work. The possibility to set the synchronization between generators based on the system under investigation was shown. A communication system was experimentally realized using chaotic generators.

Ukraine, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University.

Іванюк П. В., Політанський Л. Ф., Політанський Р. Л. **Хаотичне маскування інформаційних сигналів з використанням генератора на базі системи Лю.**

Ключові слова: хаос, гіперхаос, хаотичне маскування, хаотична синхронізація, система Лю, спектр показників Ляпунова.

В роботі розраховано спектр показників Ляпунова для хаотичної системи Лю. Показано можливість встановлення режиму синхронізації між генераторами, що базуються на дослідженій системі. Експериментально реалізовано систему передачі інформації з використанням генераторів хаотичних коливань.

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Губарев В. В. Информатика: прошлое, настоящее, будущее.— Москва: Техносфера, 2011.— 432 с.

В пособии излагается взгляд автора на то, что такое информатика, ее состав, основные понятия, концепция описания ее истории и поколений средств вычислительной техники. Особое внимание уделяется хронологии создания базовых средств и технологий информатики, сведениям о лицах, внесших весомый вклад в развитие разных разделов информатики, а также ближайшим перспективам их развития. Содержатся многочисленные справочные, в частности статистические, сведения и перечень междисциплинарных проблемных вопросов, касающихся понятия информации, информатики и ее разделов. В книгу включены учебные и справочные материалы, предназначенные для изучения в рамках учебного процесса при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Информатика и вычислительная техника», «Прикладная математика и информатика», «Программная инженерия», «Системный анализ и управление», «Информационные системы и технологии», «Прикладная информатика» (по отраслям), «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем», «Управление в технических системах», «Бизнес-информатика», «Информационная безопасность» и т. п. Пособие может быть полезно студентам, обучающимся по направлениям «Математика и компьютерные науки», «Фундаментальная информатика и информационные технологии», «Интеллектуальные системы в гуманитарной сфере», «Инфо-коммуникационные технологии и системы связи» и т. п., многим преподавателям и аспирантам, а также всем, желающим системно познать, что такое информатика, ее концептуальные основы, структура, история и методология, этапы становления и направления развития.



УДК 625.315.592

Д. ф.-м. н. В. А. БОРЩАК

Украина, Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова

E-mail: borschak_va@mail.ru

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ СЕНСОРА НА БАЗЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА $\text{CdS-Cu}_2\text{S}$

Создана универсальная программа, позволяющая управлять процессом сканирования датчика изображения, производить обработку полученных данных с целью компенсации неоднородности фоточувствительности сенсора и преобразовывать файл с видеoinформацией в любой формат, доступный стандартным программам, работающим с изображениями.

Ключевые слова: сенсор изображений, неоднородность фоточувствительности, неидеальный гетеропереход.

Неидеальный гетеропереход $\text{CdS-Cu}_2\text{S}$, как было установлено в [1], можно использовать в качестве эффективного сенсора оптического и рентгеновского изображений с внутренним усилением. Конструктивно сенсор представляет собой тонкопленочный гетеропереход $\text{CdS-Cu}_2\text{S}$. Контакт к сульфиду кадмия служит сплошной прозрачный проводящий слой диоксида олова, нанесенный на стеклянную подложку размером 50×25 мм. Контакт к сульфиду меди представляет собой термически осажденную в вакууме медную пленку с прижатой к ней золотой сеткой. Размер фоточувствительной поверхности определяется размером слоя сульфида меди (42×25 мм). При такой конструкции запись изображения и его считывание можно производить только со стороны сульфида кадмия.

Изображение в таком сенсоре формируется неравновесным зарядом, захваченным глубокими ловушками в области пространственного заряда (ОПЗ), где имеется значительный рекомбинационный барьер, препятствующий рекомбинации захваченного заряда со свободными носителями. Установлено, что скрытое изображение даже при комнатной температуре может храниться в таком сенсоре достаточно долго [1].

Тем не менее, определяемый различными механизмами выброс неравновесного заряда из ОПЗ [2–4] имеет место, и это может вызывать значительную неоднородность фоточувствительности сенсора вдоль его поверхности.

Важным и интересным с практической точки зрения является выяснение вопроса о наличии повторного захвата носителей при их выбросе с центров захвата [5]. При термическом выбросе дырок они попадают в поле ОПЗ и быстро удаляются в узкозонный слой, поэтому повторный

захват представляется в этом случае маловероятным, хотя, в принципе, возможным.

Для экспериментальной проверки этого предположения исследовалась форма видеосигнала одной строки сенсорной матрицы сразу после прекращения возбуждения и по истечении 6 часов. Возбуждение производилось путем экспонирования разных точек сенсора точечными световыми объектами одинаковой яркости. Было установлено, что после этого заметного уширения пиков сигнала не наблюдается. Это позволяет сделать вывод о том, что повторный захват на ловушечные центры не происходит даже после длительной релаксации. Так как интенсивность возбуждения во всех точках была одинакова, предполагается, что различие уровня сигнала в различных пиках обусловлено неоднородностью фоточувствительности исследуемых образцов, что является недостатком такой структуры при использовании ее в качестве сенсора изображения. Подобная неоднородность, как показано в [6], вызвана изменением концентрации глубоких дырочных ловушек вдоль поверхности гетероперехода. Для того чтобы получать качественные изображения с помощью исследуемого сенсора, необходимо учитывать неоднородность фоточувствительности ее элементов. Целью настоящей работы было создание способа компенсации такой неоднородности при компьютерной обработке изображений.

Методика обработки изображений

Была создана универсальная программа в среде программирования C++, позволяющая управлять процессом сканирования сенсора изображения и обрабатывать полученные данные с последующим выводом изображения на мони-

тор компьютера, а также преобразовывать файл с видеоинформацией в любой формат, доступный стандартным программам, работающим с изображениями. Таким образом, для получения изображения программа управляет контроллером, производящим сканирование, и получает от него данные об интенсивности видеосигнала в каждой точке сенсора. В результате этого в память компьютера заносится матрица данных размером 128×128 или 256×256 (разрешение сканирования), соответствующая интенсивности видеосигнала на поверхности образца, который может быть сохранен в виде файла.

Для учета неоднородности сенсора необходимо получить дополнительную информацию, характеризующую значения темнового тока и фоточувствительности в каждой точке поверхности преобразователя. С этой целью в первую очередь производится сканирование сенсора в равновесном (темновом) состоянии, в результате чего программа создает файл данных `black.img`, записывает его на диск и сохраняет в постоянной памяти компьютера в специальном формате, удобном для использования. Следующий этап — сканирование сенсора, освещенного однородным белым светом, в результате чего создается файл данных `white.img`. Приведя сенсор в равновесное состояние, можно произвести экспонирование его поверхности каким-либо изображением и после сканирования получить данные об уровне видеосигнала в каждой его точке (файл `initial.img`). Таким образом получают все необходимые данные для последующей обработки изображения. Следует иметь в виду, что файлы `black.img` и `white.img` являются индивидуальной характеристикой конкретного сенсора и могут использоваться при обработке изображений, получаемых только с его помощью.

Разработанная программа имеет два режима обработки изображения:

1. Вычитание из исходного изображения уровня «черного» (значения видеосигнала в каждой точке для равновесного состояния сенсора).

2. Дополнительный учет неоднородности фоточувствительности сенсора.

Первый режим применяется для учета неоднородности чувствительности преобразователя, приведенного в равновесное состояние, которая может быть вызвана различием значений концентрации донорных центров и концентрации центров рекомбинации на металлургической границе в различных точках. В процессе этой обработки также производится вычитание в каждой точке минимального значения сигнала, что позволяет устранить влияние на изображение пола аппарата нуля усилителя.

Второй режим обработки включает в себя несколько операций, позволяющих учесть также неоднородность, являющуюся следствием различия значений концентрации центров захвата неравновесных носителей в области пространствен-

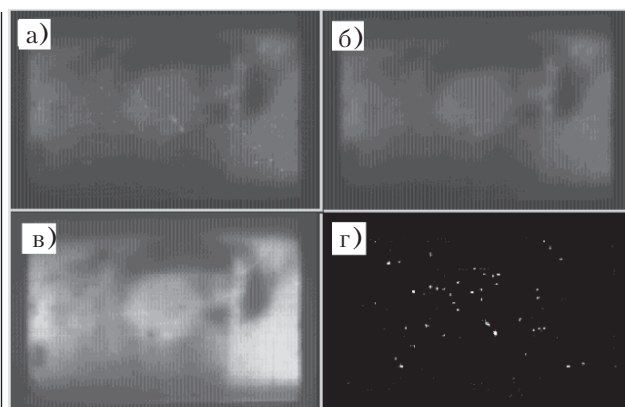


Рис. 1. Примеры визуализации файлов данных: *a* — исходное необработанное изображение (`initial.img`); *б* — равновесное состояние (`black.img`); *в* — неравновесное состояние после воздействия однородным белым светом (`white.img`); *г* — результат обработки изображения (`result.img`)

ного заряда. Во-первых, производится, как и в первом режиме, вычитание уровня «черного» для получения промежуточного массива данных. Такая же операция производится со значениями файла `white.img`, что позволяет получить коэффициенты, характеризующие чувствительность сенсора в каждой точке. Используя эти коэффициенты для обработки промежуточного массива, получаем конечный файл изображения (`result.img`), в котором устранены все неоднородности сенсора. Для удобного представления результатов выходные данные нормируются к 255.

Графически результаты с помощью программы могут быть представлены в двух видах:

- изображение объекта на экране дисплея (позитив-негатив);
- график зависимости уровня видеосигнала от координаты.

Визуализация возможна как для окончательно обработанного изображения (файл `result.img`), так и для первоначально полученных данных (файлы `black.img`, `initial.img`, `white.img`). Для удобства дальнейшей работы с изображениями программа позволяет преобразовывать их в стандартный графический формат РСХ, который затем может быть преобразован в любой другой.

На **рис. 1** представлены результаты работы модуля визуализации разработанной программы на различных этапах обработки данных. Исходное изображение звездного неба (рис. 1, *a*) получено при экспонировании сенсора на телескопе (рефракторе) астрономической обсерватории Одесского национального университета им. И. И. Мечникова.

Несмотря на достаточно высокую неоднородность исследуемого сенсора (рис. 1, *в*), разработанные алгоритмы обработки данных позволяют компенсировать ее и значительно улучшить качество изображения (рис. 1, *г*). Это подтверждает и **рис. 2**, на котором приведено обработанное изображение, записанное при освещении



Рис. 2. Полутонное изображение, полученное при помощи сенсора на основе неидеального гетероперехода с разрешением 250×250

обычной лампой накаливания, которая давала освещенность на объекте порядка 100 люкс, и с экспозицией $1/8$ с.

Таким образом, созданная универсальная программа позволяет управлять процессом сканирования датчика изображения и проводить обработку полученных данных с последующим выводом изображения на монитор компьютера, а также преобразовывать файлы с видеoinформацией в любой формат, доступный стандартным программам, работающим с изображениями.

Разработанная и изготовленная установка для записи, считывания и визуализации изображений, полученных при помощи сенсора на основе неидеального гетероперехода, позволяет проводить исследования с целью совершенствования сенсоров прежде всего за счет уменьшения их неоднородности и повышения стабильности. Программа в сочетании с разработанным сенсором может служить прототипом датчика изображений, который может применяться в области медицины или при астрономических исследованиях. В дальнейшем будут исследованы возможности применения такого сенсора для получения изображений микроэлектронных устройств.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Vassilevski D. L. Physical principles of graphic data registration by non-ideal heterojunction // Sensors and Actuators. A: Physical. — 1996. — Vol. 55, N 2–3. — P. 167–172.
2. Smyntyna V. A., Borschak V. A., Kutalova M. I. et al. Application of notions of sensitometry to the solid-state image sensor based on nonideal heterojunction // Proc. of the Conf. XXII EUROSORS. — Germany, Dresden. — 2008. — P. 58.
3. Borschak V. A. Nonequilibrium charge relaxation processes in the barrier zone of nonideal heterojunction // Functional Materials. — 2003. — Vol. 10, N 2. — P. 306–309.

4. Балабан А. П., Борщак В., Бритавский Е. В., Смынтна В. А. Релаксация сигнала оптического сенсора на основе неидеального гетероперехода // Тр. III Междунар. науч. конфер. «Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники». — Украина, Харьков, Кацивели. — 2010. — С. 49–51. [Balaban A. P., Borshchak V., Britavskii E. V., Smyntyna V. A. Relaksatsiya signala opticheskogo sensora na osnove neideal'nogo geteroperekhoda // Tr. III Mezhdunar. nauch. konfer. «Funktional'naya komponentnaya baza mikro-, opto- i nanelektroniki». Ukraine, Kharkov, Katsiveli. 2010. P. 49]

5. Vassilevski D. L., Borschak V. A., Victor P. A. A novel heterojunction based low illumination image sensor with applications to astronomy // Sensors and Actuators. A: Physical. — 1994. — Vol. 45. — P. 191–193.

6. Борщак В. А. Процессы релаксации неравновесного заряда в барьерной области неидеальных гетеропереходов и свойства сенсоров оптических изображений на основе таких структур // Фотоэлектроника. — 2002. — Вып. 11. — С. 92–95. [Borshchak V. A. // Fotoelektronika. 2002. Iss. 11. P. 92]

Дата поступления рукописи
в редакцию 27.02 2012 г.

Borschak V. A. **Computer processing of the images obtained by a sensor based on the CdS—Cu₂S heterojunction.**

Keywords: image sensor, inhomogeneity of photosensitivity, non-ideal heterojunction.

There has been created a multipurpose program that allows to manage the image sensor scanning, to process data to compensate for the heterogeneity of the sensor photosensitivity and convert the video data file into any format, accessible to standard programs, which process images.

Ukraine, I. I. Mechnikov Odessa National University.

Борщак В. А. **Комп'ютерна обробка зображень, отриманих за допомогою сенсора на базі гетеропереходу CdS—Cu₂S.**

Ключові слова: сенсор зображень, неоднорідність фоточутливості, неідеальний гетероперехід.

Створено універсальну програму, що дозволяє управляти процесом сканування датчика зображення, проводити обробку отриманих даних з метою компенсації неоднорідності фоточутливості сенсора та перетворювати файл з відео в будь-який формат, доступний стандартним програмам, що працюють із зображеннями.

Україна, Одеський національний університет імені І. І. Мечникова.

УДК 669.762.; 621.315.592

А. И. КОНДРИК, О. А. ДАЦЕНКО, д. ф.-м. н. Г. П. КОВТУН

Украина, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua, datsenko@kipt.kharkov.ua

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В РАСТУЩЕМ КРИСТАЛЛЕ «СОЛНЕЧНОГО КРЕМНИЯ»

Методом компьютерного моделирования определены оптимальные тепловые условия выращивания методом Чохральского монокристаллов Si, пригодного для изготовления фотоэлектрических преобразователей энергии. Изучены зависимости характера температурных полей и формы фронта кристаллизации от диаметра кристалла, стадии и скорости его выращивания, а также от соотношения диаметра и высоты кристалла.

Ключевые слова: солнечный кремний, тепловые поля, скорость направленной кристаллизации, размеры кристалла.

Для изготовления фотоэлектрических преобразователей энергии (ФЭП) необходим «солнечный кремний» с чистотой не ниже 5N и обладающий моно- или мультикристаллической структурой [1, 2]. Традиционные способы получения кремния «солнечного» качества (SoG-Si) имеют низкую производительность, экологически опасны и довольно дороги. Среди новых, альтернативных технологий получения SoG-Si особое место занимает прямое восстановление кремнеземсодержащего сырья углеродным восстановителем в руднотермических печах [3, 4] с продувкой кислородом. Таким методом можно получить рафинированный кремний с суммарным содержанием примесей около 1000 ppm. Эффективным и относительно дешевым способом дальнейшей очистки является направленная кристаллизация с получением структуры, необходимой для изготовления ФЭП [2]. При этом возможно получение больших слитков моно- и мультикремния, из технологического процесса исключаются экологически вредные и взрывоопасные вещества, себестоимость получаемой продукции снижается.

Одной из аппаратных реализаций методов направленной кристаллизации может служить выращивание монокристаллов по методу Чохральского. Как правило, исходное сырье для получения монокристаллов кремния этим методом уже обладает нужной чистотой, поэтому скорость выращивания может достигать 100 мм/ч и более. В нашем же случае данный метод используется и для кристаллизационной очистки рафинированного металлургического кремния. Для данного сырья при скоростях роста свыше 10 мм/ч может возникнуть нарушение структуры кристалла, вызванное концентрационным переохлаждением [5]. Для предотвращения этого примеси отводятся в расплав путем переме-

шивания, осуществляемого при вращении кристалла в методе Чохральского. Тогда скорость выращивания можно несколько повысить. По этой причине нами исследовались тепловые режимы вытягивания со скоростями, не превышающими 20 мм/ч. Существенное влияние на процесс кристаллизационной очистки оказывает также форма фронта кристаллизации, которая зависит от стадии и скорости выращивания. Для сохранения оптимального угла при диффузии примеси в расплав необходимо выдерживать форму фронта кристаллизации, близкую к плоской, на всех стадиях выращивания. Кроме того, форма фронта кристаллизации может служить визуальным параметром для контроля структурного совершенства и формы растущего кристалла [6, 7].

Целью настоящей работы было изучение тепловых полей и скоростей выращивания монокристаллов SoG-Si различных диаметров методом Чохральского на разных стадиях вытягивания при условии сохранения формы фронта кристаллизации, близкой к плоской. Методом компьютерного моделирования изучались температурные поля и форма фронта кристаллизации в зависимости от диаметра, скорости и стадии процесса выращивания.

Качество получаемых кристаллов зависит от состава расплава и процессов тепло- и массообмена в системе «тигель — кристалл — расплав». Для управления процессом выращивания необходимо учитывать характер подвода тепла к стенкам тигля и ориентацию тигля отношению к фронту кристаллизации и направлению силы тяжести, скорость роста кристалла, размеры растущего кристалла. В общем случае температурные поля и распределение примесей в кремнии должны определяться одновременно и согласо-

ванно. В нашем случае концентрации примесей малы, они практически не влияют на температуру, поэтому задачу расчета температурных полей и распределения примесей при направленной кристаллизации можно решать последовательно.

Математическая модель

Моделирование температурных полей в системе «кристалл — расплав» проводилось с помощью программы, в основу работы которой положена двумерная модель. В этой модельной системе источником тепла является нагреватель, а стоком — охлаждаемые стенки камеры. Для решения задачи построения температурных полей в растущем кристалле были приняты упрощающие предположения. Во-первых, состояние системы считалось равновесным в каждый момент времени. Во-вторых, система имеет осевую симметрию: все величины зависят только от осевой координаты z и от радиуса r в плоскости, перпендикулярной оси z .

Следуя авторам ряда работ, например [8–10], были определены требования к расчетам температурного поля в растущем кристалле. Это необходимость учета переноса тепла кристаллом, теплового излучения с поверхности расплава и кристалла, обмена излучением между кристаллом и расплавом.

Движение расплава — вязкой несжимаемой жидкости — описывается уравнением Навье-Стокса

$$\rho v_j (\partial v_i / \partial x_j) - \rho g_i + \rho g_i \alpha_L (T - T_0) - \partial \tau_{ij} / \partial x_j, \quad (1)$$

где ρ — плотность расплава при некоторой температуре T_0 ;

v — скорость элемента жидкости;

g — ускорение свободного падения;

α_L — коэффициент теплового расширения;

τ_{ij} — тензор напряжений, $\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + h(\partial v_i / \partial x_j + \partial v_j / \partial x_i)$;

p — давление;

η — коэффициент вязкости.

К уравнению (1) нужно добавить уравнение непрерывности для несжимаемой жидкости

$$\partial v_i / \partial x_i = 0 \quad (2)$$

и уравнение теплопроводности

$$\rho c_p v_i \partial T / \partial x_i + \partial q_j / \partial x_j = 0, \quad (3)$$

где c_p — теплоемкость;

q_i — тепловой поток, $q_i = -k \partial T / \partial x_i$;

k — коэффициент теплопроводности.

Индексы i, j здесь принимают значения координат x, y, z и, таким образом, $x_x \equiv x$, $x_y \equiv y$, $x_z \equiv z$; g_i и v_i — проекции направлений силы тяжести и скорости на соответствующие координаты.

На поверхности, ограничивающей расплав, необходимо задать скорость v или силу $\tau_{ij} n_j$

(n — нормаль к поверхности). На поверхности, соприкасающейся с тиглем, $v = 0$; на поверхности, соприкасающейся с кристаллом, $v = v_p$ (v_p — скорость вытягивания кристалла); на поверхности, контактирующей с газовой средой, $\tau_{ij} n_j = n_i P_0$ (P_0 — давление газа на поверхность расплава).

Для уравнения теплопроводности (3) также необходимо задать граничные условия. На внутренней поверхности тигля тепловой поток $q = q_s$. На границе «расплав — кристалл», которая определяется изотермой $T(r, z) = T_m$ (T_m — температура плавления), нарушается непрерывность теплового потока, поскольку тут выделяется скрытая теплота кристаллизации Q :

$$k_S \nabla T_S n - k_L \nabla T_L n = \rho_S Q v_p n,$$

где индексы S и L относятся, соответственно, к кристаллу и расплаву.

Выражение для теплового потока из расплава имеет следующий вид:

$$k_L \nabla T_L n = n(T_L - T_C) + \epsilon \sigma (T_L^4 - T_r^4). \quad (4)$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (4) описывает ньютоновское охлаждение, пропорциональное разности между температурами расплава T_L и окружающей среды T_C . Второе слагаемое связано с лучевым теплообменом. Здесь ϵ — излучательная способность (emissivity), $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Дж/(с·м²·К⁴), T_r — эффективная (в смысле излучения) температура окружения. Член $\epsilon \sigma T_r^4$ описывает поток, испущенный другими нагретыми поверхностями: кристаллом, стенками камеры и т. п. Он должен быть выражен через интегралы (или суммы) по указанным поверхностям. Результирующий поток, проходящий через n -й элемент поверхности и равный второму слагаемому в правой части уравнения (4), обозначим через q_n^R [9, 10]. Он состоит из потока теплового излучения $q_k^E = \epsilon_n \sigma T_n^4$ серого тела, имеющего температуру T_n , а также отраженного потока, испущенного другими поверхностями, $(1 - \epsilon_n) f_{nk} q_k^R$ и, наконец, поглощенного потока $-\epsilon_k f_{nk} q_k^R$. Здесь предполагается, что поглощающая способность равна излучательной. Величина f_{nk} — так называемый view factor, который описывает геометрические характеристики взаимного расположения элементов n и k :

$$f_{nk} = \frac{1}{S_n} \int_{S_n} \int_{S_k} \frac{\cos \theta_n \cos \theta_k}{\pi L_{nk}^2} dS_n dS_k,$$

где S_n и S_k — площади элементов n и k ; θ_n и θ_k — углы между нормальными к элементам n и k и линией, соединяющей центры этих элементов и имеющей длину L_{nk} . Величины q_k^R определяются из уравнения

$$D_{nk} q_k^R = E_{nk} q_k^E,$$

где $D_{nk} = [\delta_{nk} - (1 - 2\epsilon_k) f_{nk}] / \epsilon_n$; $E_{nk} = \delta_{nk}$.

Итак, состояние расплава характеризуется полями скорости v , давления p и температуры T , которые определяются из уравнений (1), (2) и (3). Состояние кристалла в нашем случае описывается только температурой, которая находится из уравнения теплопроводности

$$\nabla(k_S \nabla T) - \rho_S c_{pS} v_p \nabla T = 0.$$

Таким образом, решение задачи построения температурного поля в кристалле сводилось к решению методом конечных элементов нелинейных уравнений с частными производными и нелокальными граничными условиями. Алгоритм численного решения описан в [11, 12].

Результаты моделирования и их анализ

На **рис. 1** продемонстрирован результат проведенного моделирования. Изотерма с температурой 1693 К является границей раздела между расплавом и кристаллом.

Структурное совершенство выращиваемого кристалла и его физические свойства зависят от формы фронта кристаллизации, на который влияет скорость роста. Было проведено исследование влияния скорости вытягивания v и диаметра кристалла d , выращиваемого методом Чохральского, на характер температурных полей в нем. Моделирование при изменении v в диапазоне 1–20 мм/ч и d от 80 до 250 мм позволило установить, что с возрастанием v форма фронта раздела фаз меняется от почти плоской

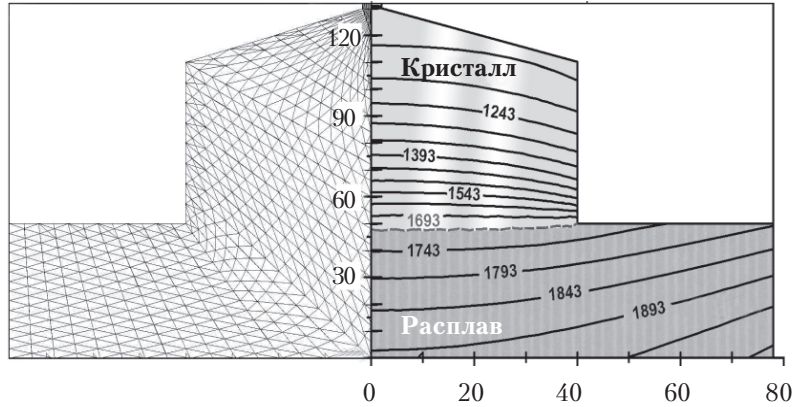


Рис. 1. Результат решения уравнений теплопроводности в системе «кристалл — расплав» методом конечных элементов для кристалла диаметром 80 мм (на осях указаны значения в мм)

к вогнутой, причем при сохранении высоты кристалла и увеличении его диаметра эти изменения усиливаются (это можно увидеть на **рис. 2**, где приведены некоторые из полученных результатов). Иначе говоря, наиболее вогнутая форма наблюдается в кристалле наибольшего диаметра, который выращивается с наивысшей скоростью (см. **рис. 2, з**). Проведенные исследования также показали, что при условии пропорционального увеличения диаметров кристалла и тигля и сохранении скорости роста форма фронта кристаллизации остается неизменной.

Степень влияния скорости кристаллизации и диаметра кристалла на форму фронта раздела фаз зависит от стадии выращивания: на более поздних этапах выращивания скорость вытягивания и диаметр кристалла меньше влияют на искривление границы раздела фаз (см. **рис. 2** и

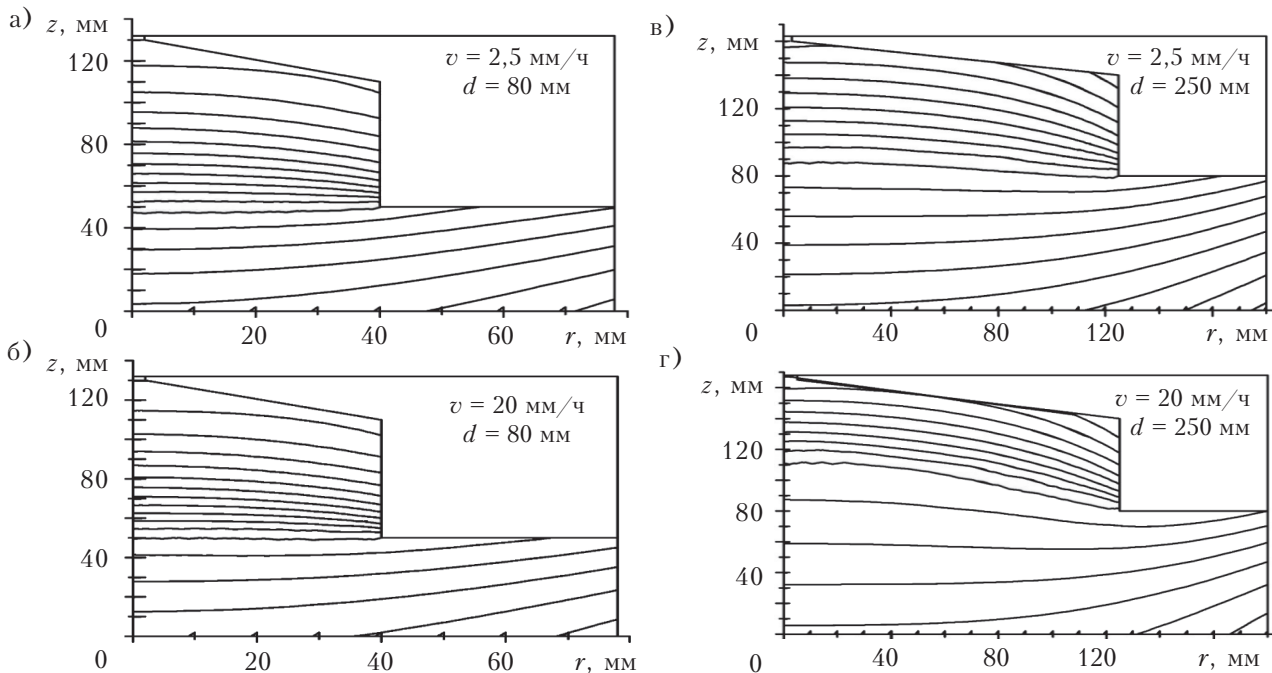


Рис. 2. Температурные поля в системе «кристалл — расплав» при получении кристаллов Si высотой 60 мм диаметром 80 мм (а, б) и 250 мм (в, г) при скорости вытягивания 2,5 мм/ч (а, в) и 20 мм/ч (б, г)

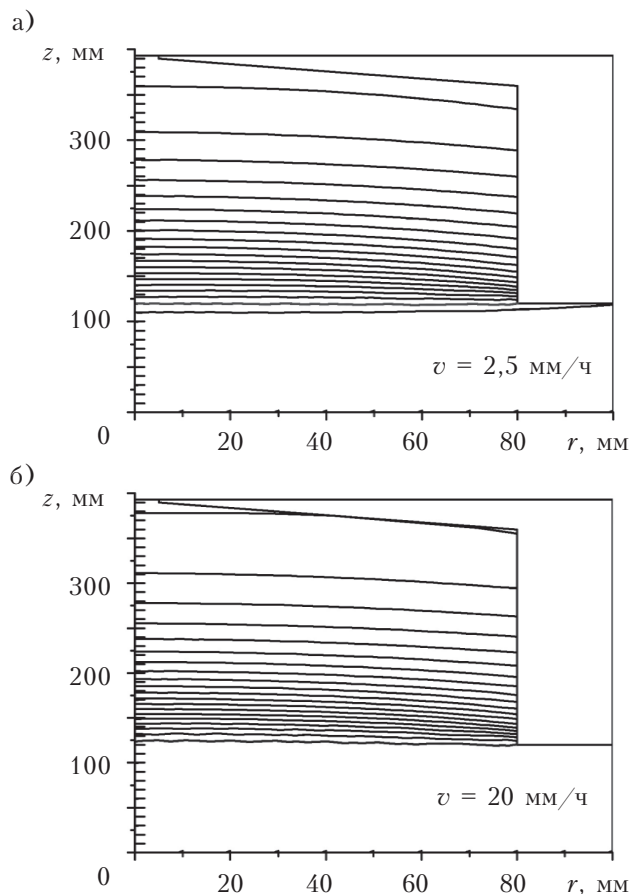


Рис. 3. Температурные поля в системе «кристалл — расплав» при скоростях вытягивания 2,5 и 20 мм/ч на поздней стадии выращивания кристалла высотой 240 мм и диаметром 160 мм

рис. 3). По этой причине на начальной стадии скорость выращивания не должна превышать 2—3 мм/ч. На более поздних стадиях скорость можно постепенно увеличивать, доводя до значений, которые могут ограничиваться величиной, определяющей концентрацией примесей в исходном сырье.

Исследования также показали, что при неизменной скорости выращивания форма фронта кристаллизации, распределение тепловых полей и температурных градиентов вблизи границы раздела фаз зависят в основном от соотношения диаметра и высоты кристалла. Это справедливо в случае, когда при изменении диаметра кристалла пропорционально изменяется и объем расплава.

Следует отметить, что требуемая форма фронта кристаллизации зависит от кристаллографического направления выращивания монокристалла, однако в большинстве случаев он должен быть близок к плоскому. Скорость выращивания целесообразно задавать исходя из тепловых условий вблизи фронта и начальных условий кристаллизационной очистки от конкретных при-

месей в соответствии с требованиями, которые предъявляются к чистоте «солнечного кремния».

Проведенное моделирование тепловых полей в растущем кристалле позволяет в дальнейшем выполнить расчет распределения электрически активных примесей по объему кристаллов разных размеров, выращиваемых с разными скоростями.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Непомнящих А.И. Кремний для солнечной энергетики // Известия Томского политехнического университета. — 2000. — Т. 303, вып. 2. — С. 176—190. [Nepomnyashchikh A.I. // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2000. Vol. 303, iss. 2. P. 176]
2. Немчинова Н. В., Клѣц В. Э., Непомнящих А. И. и др. Примеси в кремнии «солнечного» качества и пути их удаления // Матер. I Междунар. науч.-практ. конф. «Европейська наука XXI століття: стратегія і перспективи розвитку». — Україна, м. Дніпропетровськ, 2006. — Т. 22. — С. 5—9. [Nemchinova N. V., Klyots V. E., Nepomnyashchikh A. I. i dr. Primesi v kremnii «solnechnogo» kachestva i puti ikh udaleniya // Mater. I Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Evropeis'ka nauka XXI stolittya: strategiya i perspektivi rozvitku». Ukraine, Dnipropetrovs'k, 2006. Vol. 22. P. 5]
3. Немчинова Н. В., Клѣц В. Э. Оптимизация карботермического процесса получения кремния в электродуговых печах // Матер. Междунар. науч.-практ. конф. «Металлургия цветных металлов. Проблемы и перспективы». — Россия, г. Москва. — 2009. — С. 120—121. [Nemchinova N. V., Klyots V. E. Optimizatsiya karbotermicheskogo protsessa polucheniya kremniya v elektrodugovykh pechakh // Mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Metallurgiya tsvetnykh metallov. Problemy i perspektivy». Russia, Moskva. 2009. P. 120]
4. Nemchinova N. V., Belsky S. S., Krasin B. A. High-purity metallurgical silicon as base element for solar energy // European journal of Natural History, Mater. of the confer. «Climate and environment». — Netherlands, Amsterdam. — 2006. — P. 95—96.
5. Сарычев П. П., Непомнящих А. И., Тарасова С. М. Выращивание кристаллов мультикремния методом Бриджмена с управляемым режимом конвекции // VI Междунар. конф. и V школа молодых ученых и специалистов... «Кремний-2009». — Россия, г. Новосибирск. — 2009. — <http://silicon2009.niic.nsc.ru/rus/newsr.htm>. [Sarychev P. P., Nepomnyashchikh A. I., Tarasova S. M. Vyrashchivanie kristallov mul'tikremniya metodom Bridzhmena s upravlyaemym rezhimom konveksii // VI Mezhdunar. konfer. i V shkola molodykh uchenykh i spetsialistov... «Kremnii-2009». Russia, Novosibirsk. 2009. <http://silicon2009.niic.nsc.ru/rus/newsr.htm>]
6. Фалькевич Э. С., Пульнер Э. О., Червонный И. Ф. и др. Технология полупроводникового кремния. — Москва: Металлургия, 1992. [Fal'kevich E. S., Pul'ner E. O., Chervoniy I. F. i dr. Tekhnologiya poluprovodnikovogo kremniya. Moscow. Metallurgiya, 1992]
7. Таран Ю. Н., Куцова В. З., Червонный И. Ф. и др. Полупроводниковый кремний: теория и технология производства. — Запорожье: ЗГИА, 2004. [Taran Yu. N., Kutsova V. Z., Chervoniy I. F. i dr. Poluprovodnikovyi kremnii teoriya i tekhnologiya proizvodstva. Zaporozh'e. ZGIA, 2004]
8. Medouye G. O., Bacon D. J., Evans K. E. Computer modelling of temperature and stress distributions in LEC-grown GaAs crystals // J. Cryst. Growth. — 1991. — Vol. 108. — P. 627—636.

9. Virzi A. Computer modelling of heat transfer in Czochralski silicon crystal growth // J. Cryst. Growth. — 1991. — Vol. 112. — P. 699—722.

10. Atearcon L. G., Derby J. J., Brown R. A. Radiative heat exchange in Czochralski crystal growth // J. Cryst. Growth. — 1987. — Vol. 84. — P. 57—78.

11. Nicodeme P., Dupret F., Crochet M. J. et al. Numerical simulation of transfer in LEC growth of gallium arsenide // Proc. of 5-th Int. Conf. on Semi-Insulation III-V Materials. — Sweden, Malmo. — 1988. — P. 471—476.

12. Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. — Москва: Наука, 1984. [Paskonov V. M., Polezhaev V. I., Chudov L. A. Chislennoe modelirovanie protsessov teplo- i massoobmena. Moscow. Nauka, 1984]

Дата поступления рукописи
в редакцию 10.02 2012 г.

Kondrik A. I., Datsenko O. A., Kovtun G. P. **Temperature fields in a growing solar silicon crystal.**

Keywords: solar silicon, thermal fields, rate of directional crystallization, crystal size.

The optimal thermal terms for growing by Czochralski method Si single-crystals, suitable for making photoelectric energy converters, has been defined by the

computer simulation method. Dependences of temperature fields character and crystallization front form on the diameter of the crystal, stage and speed of growing, and also on correlation between diameter and height of the crystal has been studied.

Ukraine, NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology".

Кондрік А. І., Даценко О. А., Ковтун Г. П. **Температурні поля в кристалі «сонячного кремнію», що росте.**

Ключові слова: сонячний кремній, теплові поля, швидкість спрямованої кристалізації, розміри кристала.

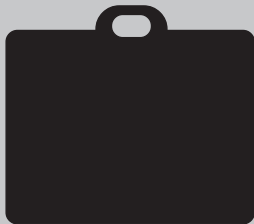
Методом комп'ютерного моделювання визначено оптимальні теплові умови вирощування методом Чохральського монокристалів Si, придатного для виготовлення фотоелектричних перетворювачів енергії. Вивчено залежності характеру температурних полів і форми фронту кристалізації від діаметра кристала, стадії та швидкості вирощування, а також від співвідношення діаметру та висоти кристала.

Україна, ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут».

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Исследование температурной зависимости контактного сопротивления омических контактов к InP (Украина, г. Киев)
- Эффективность сбора зарядов в датчиках γ -излучений с различной конфигурацией электродов (Украина, г. Харьков)
- Многоуровневые платы с толсто пленочной полимерной изоляцией (Россия, г. Арзамас)
- Индуктивность, электрически перестраиваемая полупроводниковой структурой (Россия, г. Саратов)
- Влияние распределения примеси в базе на фотоэлектрические свойства поверхностно-барьерных ультрафиолетовых фотоприемников (Украина, г. Киев)
- Синхронизация потоков данных в многоканальных системах цифровой обработки сигналов с перестраиваемой структурой (Украина, г. Одесса)
- Повышение надежности диодов Шоттки при воздействии разрядов статэлектричества (Беларусь, г. Минск)
- Использование формализованных показателей для оценки качества при проектировании радиотехнических систем охраны периметров территориально-распределенных объектов (Украина, г. Харьков)
- Высокотемпературные датчики давления с тензорезисторами на основе нитевидных кристаллов кремния (Украина, г. Львов)



- Фотодиод с повышенной чувствительностью в коротковолновой области УФ спектра на основе фосфида галлия (Украина, г. Черновцы)
- Получение и свойства широкозонных халькогенидных сцинтилляторов на основе соединений $A_{II}B_{VI}$ (Украина, г. Харьков)
- Фотоэлектрические свойства гетеропереходов n -SiC/ n -Si (Украина, г. Харьков)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

УДК 621.315.592.2:546.681"19

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ¹, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА¹, к. т. н. А. З. РАХМАТОВ²,
к. т. н. С. Л. СКОРНЯКОВ³, Д. А. ПЕТРОВ⁴, О. А. АБДУЛХАЕВ¹

Узбекистан, г. Ташкент, ¹НПО «Физика-Солнце»; ²ОАО «FOTON»;

Россия, ³Новосибирский завод полупроводниковых приборов; Украина, г. Киев, ⁴Филиал ОАО «FOTON»

E-mail: foton@global.uz, foton-u@ukr.net, karimov@uzsci.net

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Предложен новый метод измерения напряжения ограничения, предназначенный для измерения параметров мощных импульсных токов ограничителей напряжения. Погрешность метода в два раза меньше погрешности известного метода прямого измерения. Исследованы зависимости допустимой мощности однокристалльных и двухкристалльных ограничителей напряжения и импульсной нагрузки от длительности импульса.

Ключевые слова: ограничитель напряжения, двухгенераторный метод, погрешность метода, импульсная мощность.

Для обеспечения бесперебойной работы объектов связи и технологического оборудования широко используются полупроводниковые ограничители напряжения. Их основное назначение — не допускать перенапряжений, возникающих в электронных и электрических устройствах, т. е. поглощать часть мощности, из-за излишка которой возникают эти перенапряжения. Поэтому конструкция конкретных ограничительных диодов характеризуется в первую очередь максимальной рассеиваемой импульсной мощностью $P_{\text{и max}}$ и максимальным импульсным током I_m , которые она обеспечивает. Ограничители напряжения первого поколения обладали малой мощностью и были рассчитаны на импульсные токи, не превышающие десятки ампер. Соответственно, измерительные стенды и методики тоже были рассчитаны на такую мощность. Первые испытательные стенды и методы исследования импульсных параметров ограничителей напряжения были разработаны Новосибирским заводом полупроводниковых приборов (Россия). Они применяются в классификаторе ограничительных диодов СМН.3.410.043ТФО, работа которого основана на прямом измерении напряжения ограничения. Погрешность этого метода включает погрешности импульсного вольтметра и выносного делителя и составляет от ± 6 до $\pm 8\%$ [1]. Однако применительно к разработанным в ОАО «FOTON» (Узбекистан) [1] полупровод-

никовым мощным симметричным двухкристалльным ограничителям напряжения, которые способны пропускать импульсные токи в сотни ампер без существенного увеличения напряжения и отличаются малым временем срабатывания, метод прямого измерения оказался неэффективным в силу нескольких причин. Во-первых, из-за того, что величина абсолютной погрешности зависит от плотности тока и сопротивления выводов ограничителя. Во-вторых, поскольку импульсная мощность блока питания с увеличением $U_{\text{огр}}$ катастрофически растет, применение прямого метода ограничено диапазоном импульсных токов 100 А, напряжением ограничения 200 В (то есть импульсной мощностью 20 кВт).

Исследуемые образцы и описание двухгенераторного метода

Исследуемые образцы кремниевых $p^+ - p - n - n^+$ -структур изготавливались на заводе ОАО «FOTON» методом одновременной двухсторонней диффузии бора и фосфора из пленкообразующих растворов КБК-45 (45% содержание борной кислоты) и КФК-54 (54% содержание фосфорной кислоты). Для приборов, рассчитанных на 100 В, основой служил n -кремний марки КЭФ-0,4, а для приборов на 200 В — КЭФ-2,0. Для обеспечения выдерживаемой импульсной мощности при воздействии токов с плотностью $10^4 - 10^6$ А/см² кристаллы ограничителя напряжения помещали между массивными теплоотводящими посеребренными медными дисками-компенсаторами, отличающимися высокими теплопроводностью и теплоемкостью. Из расчета длительности импульсов порядка 1 мс, толщина дисков выбиралась равной 0,5 мм. Однокристалльные ограничители напряжения, рассчитанные на

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка методов термической и электроимпульсной обработки для увеличения выхода при производстве дефицитных групп полупроводниковых приборов» ФТИ НПО «Физика-Солнце» АН РУз.

мощность 1,5 кВт, отличались несимметричными вольт-амперными характеристиками. Симметричные ограничители напряжения на 10 кВт представляют собой сборку из двух кристаллов с напряжением пробоя каждого 200 В (серия Z2), суммарное напряжение пробоя — 400 В. Два ограничителя напряжения спаяны серебряным припоем Пср-2.5. Ограничители напряжения на 20 кВт представляют собой четыре диода, размещенные в одном корпусе, где каждая пара соединена последовательно, и в сумме дают пробойное напряжение 400 В (серия Z4) [2–4].

Измерение напряжения ограничения исследуемых образцов проводилось по схеме, представленной на **рис. 1**. В отличие от известного метода, где используется один генератор, здесь применено два генератора. Метод основан на соотношении для напряжения ограничения

$$U_{\text{огр}} = U_{\text{П}} + r_d I_m, \quad (1)$$

где r_d — дифференциальное сопротивление в области пробоя.

Предложенная схема позволяет вместо измерения $U_{\text{огр}}$ измерять величину постоянного обратного напряжения $U_{\text{П}}$ и импульсной состав-

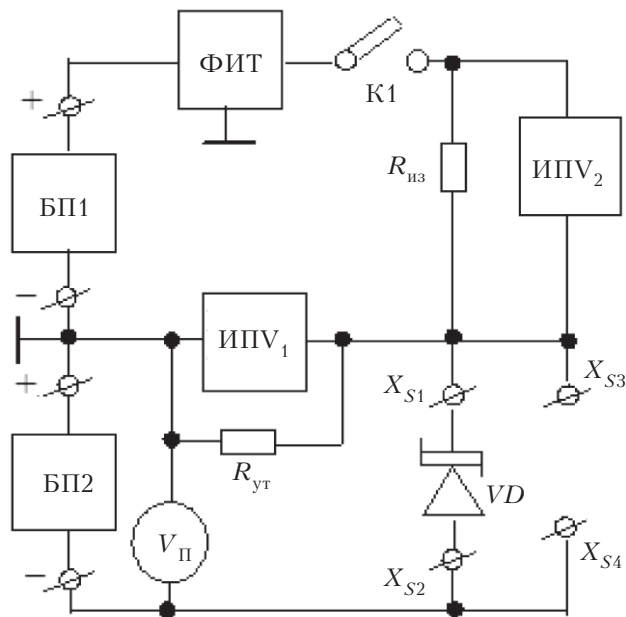


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения импульсного напряжения ограничения двухгенераторным методом:

БП1 — генератор напряжения, задающий ток; БП2 — стабилизированный генератор постоянного напряжения; ФИТ — формирователь импульсов тока; ИПВ_{1,2} — импульсные пиковые вольтметры; $V_{\text{П}}$ — вольтметр постоянного напряжения; VD — испытуемый ограничительный диод; $R_{\text{из}}$ — измерительный резистор, задающий ток через диод; $R_{\text{ут}}$ — резистор, позволяющий определить ток утечки; К1 — тиристор, задающий длительность и форму импульса; X_{S1} , X_{S2} — измерительные клеммы; X_{S3} , X_{S4} — клеммы для подключения осциллографа или эквивалента нагрузки при проверке

ляющей $r_d I_m$. Вследствие малости $r_d I_m$ (не превышает 20% $U_{\text{огр}}$ для всех ограничительных диодов) предложенный метод лишен недостатков метода прямого измерения напряжения ограничения.

В измерительной установке блок питания БП1 обеспечивает максимальный импульсный ток I_m . Погрешность установления максимального тока $\Delta I/I_m = 10\%$. Выходное напряжение $U_{\text{БП1}}$ составляет

$$U_{\text{БП1}} = (U_{\text{огр}} - U_{\text{П}}) + (R_0 + R_{\text{из}}) I_m \leq 0,2 U_{\text{огр}} + (R_0 + R_{\text{из}}) I_m, \quad (2)$$

где R_0 , $R_{\text{из}}$ — сопротивление исследуемого и измерительного диодов соответственно.

Показатель нестабильности $U_{\text{БП1}}$ должен быть не более 5%. Необходимая для реализации этого метода мощность блока питания $P_{\text{БП}} = 0,8 U_{\text{огр}} I_m$, что на 20% меньше, чем при методе прямого измерения.

Управляемый стабилизированный источник питания БП2 обеспечивает установление постоянного напряжения $U_{\text{БП2}} = U_{\text{П}}$ с погрешностью $\Delta U_{\text{П}}/U_{\text{П}}$ не более 2%. Оно измеряется и контролируется вольтметром постоянного напряжения ($V_{\text{П}}$), имеющим погрешность $\delta_{V_{\text{П}}} = 1\%$ (комбинированным прибором Ш 300). Блок питания БП2 должен обеспечивать такой постоянный ток заряда выходного конденсатора $C_{\text{вых}}$, чтобы выполнялось условие $I_{\text{БП2}} \geq I_m/\eta$, где η — скважность измерительного импульса. Величина выходной емкости $C_{\text{вых}}$ БП2 выбирается из условия $C_{\text{вых}} \geq 100 C_0$ (где C_0 — исходная емкость диода), в этом случае выходное сопротивление БП2 не вносит существенной погрешности в формирование стандартного импульса.

Резистор $R_{\text{ут}}$ предотвращает смещение нуля вольтметров за счет токов утечки испытуемого диода VD и ключа К1 в периоды паузы между импульсами. Сопротивление этого резистора выбирается из условия

$$r_d \ll R_{\text{ут}} \ll \frac{\delta_{V_{\text{П}}} U_{\text{П}}}{I_{\text{ут}}}, \quad (3)$$

которое легко выполняется, поскольку $r_d \leq 0,01$ Ом, а $I_{\text{ут}} \leq 10^{-6}$ А.

Ключ К1 должен выдерживать максимальное напряжение источника питания БП1 $U_{\text{БП1}}$, которое на величину пробивного напряжения $U_{\text{П}}$ меньше, чем в прямом методе. Ключ должен также выдерживать максимальный импульсный ток I_m .

Блок ФИТ формирует стандартный экспоненциальный импульс тока с амплитудой I_m от 7 до 93 А с помощью нормированной дифференцирующей $R_0 C_0$ -цепи. Длительность импульсов тока $t_{\text{и}}$ на уровне $0,5 I_m$ составляет $1 \text{ мс} \pm 10\%$, а длительность переднего фронта импульсов не более $10 \text{ мкс} \pm 10\%$. Скважность импульсов η не менее $10^4 \pm 10\%$.

Погрешность задания и поддержания амплитуды импульсов тока $\Delta I/I_m$ составляет $\pm 10\%$. Погрешность задания параметров элементов формирующей цепи не превышает $\delta(R_0) \leq 1\%$, $\delta(C_0) \leq 5\%$.

Импульсные пиковые вольтметры ИПВ₁ и ИПВ₂ позволяют измерять экспоненциальные импульсы с длительностью плоской вершины до миллисекунд (типа В4-17 или аналогичные). Входное сопротивление вольтметров — не менее 500 кОм.

Основная погрешность импульсного вольтметра без выносного делителя напряжения рассчитывается по формуле

$$\delta_0 = \pm(5\%U_x + 0,1\%U_{\text{пред}})/U_{\text{огр}}, \quad (4)$$

где U_x — измеряемая величина импульсного напряжения;

$U_{\text{пред}}$ — предел измерения вольтметра.

Вольтметр ИПВ₁ используется для измерения тока утечки (напряжения на сопротивлении $R_{\text{ут}}$), ИПВ₂ — для контроля амплитуды максимального импульсного тока, поскольку $U_x = R_{\text{из}}I_m$. Погрешность выносного делителя прибора ИПВ₂ составляет $\pm 2\%$.

Порядок работы на установке следующий:

— включается блок питания БП1 и вольтметры ИПВ₁, ИПВ₂ и $V_{\text{П}}$;

— к измерительным клеммам подключается испытуемый ограничительный диод;

— включается БП2, путем его регулировки устанавливается показание постоянного вольтметра $V_{\text{П}}$, равное обратному пробивному напряжению ограничительного диода $U_{\text{П}}$;

— включается ключ К1;

— результат измерения \hat{U} и режим по току I_m считываются с вольтметров ИПВ₁ и ИПВ₂.

Напряжение ограничения рассчитывается по формуле

$$U_{\text{огр}} = U_{\text{П}} + \hat{U}.$$

Контроль формы и длительности ($t_{\text{н}}$) измерительного импульса осуществляется с помощью измерительного устройства (ИУ) (осциллографа С1-65А), которое подключается к клеммам $X_{\text{СЗ}}$ и $X_{\text{С4}}$. В качестве ключевого устройства (К1), обеспечивающего максимальный ток I_m ограничительного диода и фронт включения $t_{\text{ф}} \leq t_{\text{н}}/10$, используется тиристор 1.42ТВ-6800 с импульсным током $I_m \geq 1000$ А и $t_{\text{вк}} \leq 1$ мкс).

Блок формирования импульсов тока ФИТ состоит из набора высоковольтных конденсаторов с малой утечкой и магазина точных резисторов, позволяющих задавать максимальный импульсный ток в широких пределах с постоянной времени $t_{\text{н}} = 1$ мс.

Следует отметить, что данная методика обеспечивает сохранность формы импульсов независимо от мощности импульса. Неоднократная отработка методики показала возможность задания параметров импульсов, независимость ре-

зультатов измерений от проводимости (сопротивления) выводов диодов, общей погрешности от задаваемой мощности импульса тока, а также низкие значения погрешности измерений напряжения ограничения.

Основная погрешность метода определяется погрешностью импульсного вольтметра V_1 при измерении импульсной составляющей напряжения $\hat{U}(\delta_{\hat{U}})$, погрешностью измерения и установления обратного пробивного напряжения $U_{\text{П}}(\delta_{U_{\text{П}}})$ и погрешностью, связанной с установлением и измерением режима по току (δ_{I_m}). Полный дифференциал для напряжения ограничения $U_{\text{огр}}$ с максимальным импульсным током I_m :

$$dU_{\text{огр}} = \frac{\partial U_{\text{огр}}}{\partial U_{\text{П}}} dU_{\text{П}} + \frac{\partial U_{\text{огр}}}{\partial \hat{U}} d\hat{U} + \frac{\partial U_{\text{огр}}}{\partial I_m} dI_m. \quad (5)$$

Учитывая, что $U_{\text{огр}}$ рассматривается в целом как сумма погрешности установления напряжения пробоя ($\Delta U_{\text{П}}/U_{\text{П}} = 2\%$), погрешности установления максимального тока ($\Delta I/I_m = 10\%$) и доли импульсной составляющей в напряжении ограничения ($\hat{U}/U_{\text{огр}} = 20\%$), находим

$$\frac{\Delta U_{\text{огр}}}{U_{\text{огр}}} = \frac{\Delta U_{\text{П}}}{U_{\text{П}}} \frac{U_{\text{П}}}{U_{\text{огр}}} + \frac{\Delta \hat{U}}{\hat{U}} \frac{\hat{U}}{U_{\text{огр}}} + \frac{1}{n} \frac{\Delta I}{I_m} \frac{\hat{U}}{U_{\text{огр}}}, \quad (6)$$

где n — показатель степени в механизме пробоя, для лавинного пробоя $n = 5$.

При этом составляющие погрешности метода определяются следующими соотношениями:

$$\delta_{\hat{U}} = \frac{\Delta \hat{U}}{\hat{U}} \frac{\hat{U}}{U_{\text{огр}}} = \delta_0 \frac{\hat{U}}{U_{\text{огр}}} = 6 \cdot \frac{1}{5} = 1,2\%, \quad (7)$$

где δ_0 — погрешность импульсного вольтметра V_1 , для предела измерений 100 В $\delta_0 = \pm(5\%U_x + 0,1\%U_{\text{пред}}) \approx 6\%$;

$$\delta_{U_{\text{П}}} = \frac{\Delta U_{\text{П}}}{U_{\text{П}}} \frac{U_{\text{П}}}{U_{\text{огр}}} = 2\% \cdot 0,8 = 1,6\%, \quad (8)$$

где $\Delta U_{\text{П}}/U_{\text{П}} = 2\%$ — погрешность установления пробивного напряжения;

$$\delta_{I_m} = \frac{1}{n} \frac{\Delta I}{I_m} \frac{\hat{U}}{U_{\text{огр}}} = \frac{1}{5} \cdot 10\% \cdot \frac{1}{5} = 0,4\%. \quad (9)$$

Основная среднеквадратичная ошибка данного метода составляет

$$\delta_{\text{ср}} = \pm \sqrt{\delta_{\hat{U}}^2 + \delta_{U_{\text{П}}}^2 + \delta_{I_m}^2} = \pm \sqrt{1,2^2 + 1,6^2 + 0,4^2} = \pm 2,04\%. \quad (10)$$

Таким образом, проведенные измерения ограничения напряжения импульсных диодов показали, что предложенный метод имеет погреш-

ность, существенно меньшую (в 2–3 раза), чем погрешность метода прямого измерения (6%).

Воздействие импульсов на допустимую мощность и импульсную наработку ограничителей напряжения

На основе предложенного метода измерения напряжения ограничения были определены зоны устойчивой работы и выдерживаемые мощности (соответствующие 50% от максимальной импульсной мощности) маломощных (1,5 кВт) однокристалльных и высоковольтных (400 В) двухкристалльных мощных (в импульсе — до 1000 кВт) ограничительных диодов.

Длительность импульса тока выбирали вдвое меньше номинальной и задавали максимальный ток и мощность. Сортировка ограничительных диодов проводилась по значениям дифференциального сопротивления диода в прямом включении на малом токе, которое измерялось до и после воздействия серии импульсов. Выдержавшие воздействие малой мощности приборы подвергались воздействию серии импульсов, ток и мощность которых в 1,5 раза превышали номинальные. Затем мощность и ток импульса воздействия возвращались к номинальным значениям, длительность импульса увеличивалась пошагово до номинальной, а число импульсов в серии уменьшалось до единицы. Скважность импульсов в серии была не менее 30000, а время между импульсами — не менее 30 с.

Исследуемые образцы были разбиты на две группы и разделены на выборки по 3–4 штуки с близкими параметрами. В первую группу образцов входят однокристалльные диоды с напряжением пробоя 100 В. Вторая группа образцов представляет двух- и четырехкристалльные диоды с напряжением пробоя 200 и 400 В соответственно. В диодах на 10 кВт напряжение пробоя каждого составляет 200 В, и на вольт-амперной характеристике имеются обратные ветви. В ограничителях напряжения на 20 кВт пробивные напряжения суммируются (400 В). В этом случае тоже имеются обратные ветви с пробивным напряжением 200 В.

Для определения ресурса полученных ограничителей напряжения на 1,5 кВт были проведены их испытания на наработку в зависимости от импульсной мощности и длительности импульсов (рис. 2 и 3). При воздействии импульсов на уровне $0,8P_{\text{имп max}}$ получается импульсная наработка не менее 800 импульсов, а снижение мощности до уровня $0,5P_{\text{имп max}}$ за счет снижения импульсного тока позволяет получить наработку для примерно 10^4 импульсов перегрузки.

По мере увеличения числа и длительности импульсов уменьшается допустимая импульсная мощность диода (рис. 3). Увеличение длительности импульса от 10 мкс до 20 мс приводит к уменьшению выдерживаемой мощности при одном и том же количестве импульсов (каждому увеличению длительности импульса на порядок

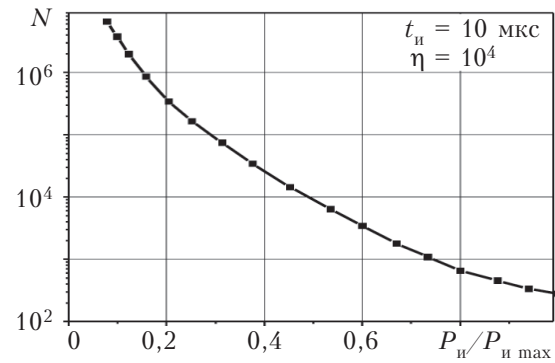


Рис. 2. Зависимость импульсной наработки N диода от максимальной мощности импульса при $I_m = 70$ А

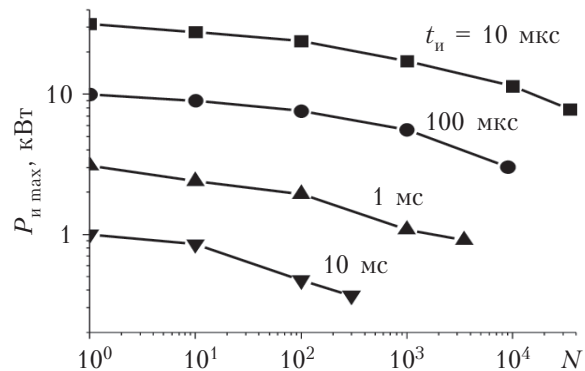


Рис. 3. Зависимость максимальной мощности импульса диода от числа импульсов N при разной их длительности $t_{\text{и}}$

соответствует трехкратное уменьшение мощности). В зависимости от скважности импульса выдерживаемая импульсная мощность в исследуемых ограничителях напряжения (диодах типа 1,50Н39АС) тем больше, чем меньше η длительность импульса. Уменьшение скважности импульса приводит к снижению выдерживаемой мощности, а по мере увеличения длительности импульсов уменьшается допустимая импульсная мощность (рис. 4, а).

Исследования зависимости импульсной мощности симметричных высоковольтных ограничителей напряжения (двухкристалльных серии Z2 и четырехкристалльных серии Z4) от длительности импульса показали, что в них выдерживаемые мощности уменьшаются по одному и тому же закону (рис. 4, б).

Особенностью зависимости максимальной импульсной мощности от длительности импульса для заданной скважности является то, что при длительности импульса до $2 \cdot 10^{-3}$ мс еще эффективен отвод тепла и наблюдается незначительный спад $P_{\text{и}}$. Однако в дальнейшем ограничитель напряжения выходит на режим, когда пропорционально длительности импульса уменьшается выдерживаемая мощность. В двухкристалльных ограничителях напряжения эта зависимость сразу выходит на участок пропорциональной зависимости выдерживаемой мощности от длительности

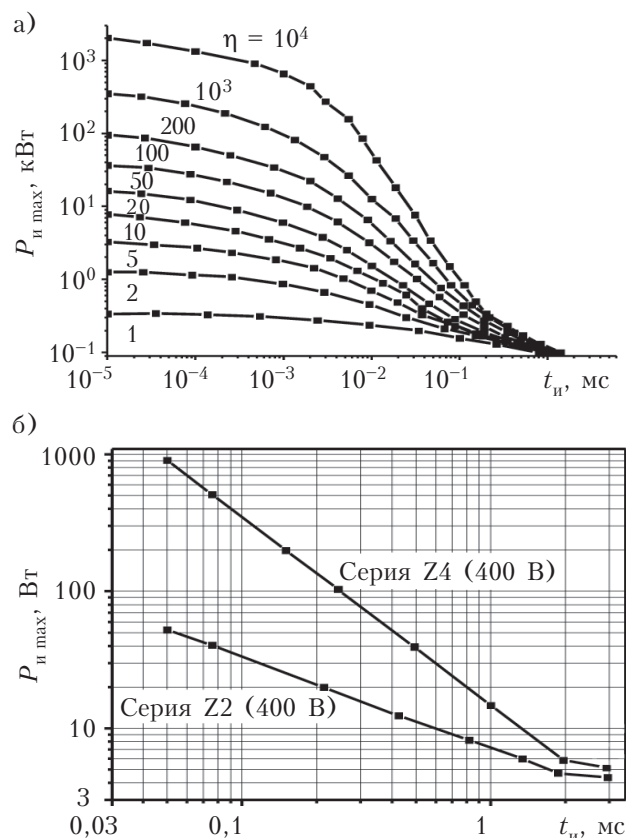


Рис. 4. Зависимость выдерживаемой мощности от длительности импульса при различной его скважности (а) и для ограничителей разных серий (б)

ности импульса. В случае четырехкристалльных ограничителей напряжения выдерживаемая импульсная мощность становится на порядок больше по сравнению с двухкристалльным ограничителем напряжения при одинаковой величине напряжения пробоя (400 В).

Таким образом, на основе оценки погрешностей прямого и компенсационного методов определения напряжения ограничения ограничительных диодов отдано предпочтение двухгенераторному методу, поскольку он позволяет уменьшить погрешность измерения мощных импульсных токов диодов, превышающих десятки ампер. Экспериментально показаны предельно допустимые режимы эксплуатации ограничителей напряжения при импульсном воздействии мощностью от 1 до 1000 кВт. Ограничительные диоды типа 1,50Н39АС при малых скважностях импульсов выдерживают малые мощности пиков длинных импульсов и мощные импульсы малой длительности вплоть до 10^{-3} мс.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Скорняков С. П., Рахматов А.З. Ограничители напряжения // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. — Москва, 1991. — Вып. 2. — С. 53–61.

[Skornyakov S. P., Rakhmatov A. Z. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory. Moskva, 1991. Iss. 2. P. 53]

2. Патент РУз № 5328. Способ изготовления кремневых ограничителей напряжения / А. Ф. Муратов, А. З. Рахматов, А. А. Меркулов, И. Р. Исмоилов // 1994 г. — Бюл. № 3. [Patent RUz № 5328. / A. F. Muratov, A. Z. Rakhmatov, A. A. Merkulov, I. R. Ismoilov // 1994. Bull. N 3]

3. Рахматов А. З., Ёдгоров Д. М., Каримов А. В. Электронные процессы в модулируемых областях кремниевой p^+-n-n^+ -структуры в режиме запираания // Доклады АН РУз. — Ташкент. — 2008. — № 4. — С. 27–30. [Rakhmatov A. Z., Yodgorova D. M., Karimov A. V. // Doklady AN RUz. — Tashkent. 2008. № 4. S. 27]

4. Пат. 2213392 Россия. Высоковольтный полупроводниковый симметричный ограничитель напряжения / Е. М. Гейфман, В. В. Чибиркин, В. В. Елисеев и др. — 2003. — Бюл. № 27. [Pat. 2213392 Russia / E. M. Geifman, V. V. Chibirkin, V. V. Eliseev i dr. 2003. Bull. N 27]

Дата поступления рукописи
в редакцию 30.01 2012 г.

Karimov A. V., Yodgorova D. M., Rakhmatov A. Z., Skornyakov S. L., Petrov D. A., Abdulkhayev O. A. **Investigation of pulsed voltage limiters characteristics.**

Keywords: voltage limiter, dual generator method, error of method, pulsed power.

A new method for measuring the voltage limit is offered. It has been designed to measure high-power pulsed current of voltage limiters. The error of this method is half as much as the error of the known method of direct measurement. The investigation of dependence of power capability of single-crystal and double-crystal voltage limiters and of the pulsed operation time on pulse duration.

Uzbekistan, Tashkent, SPA "Physics-Sun", «JSC «FOTON»; Russia, Novosibirsk Semiconductor Devices Plant; Ukraine, «FOTON» plant, the Kiev branch.

Карімов А. В., Ёдгорова Д. М., Рахматов А. З., Скорняков С. Л., Петров Д. А., Абдулхаєв О. А. **Дослідження імпульсних характеристик обмежувачів напруги.**

Ключові слова: обмежувач напруги, двогенераторний метод, похибка методу, імпульсна потужність.

Запропоновано новий метод вимірювання напруги обмеження, призначений для вимірювання параметрів потужних імпульсних струмів обмежувачів напруги. Похибка методу в два рази менше похибки відомого методу прямого вимірювання. Досліджено залежності допустимої потужності однокристалльних і двокристалльних обмежувачів напруги та імпульсного наробку від тривалості імпульсу.

Узбекистан, м. Ташкент, НВО «Фізика-Сонце», «ВАТ «FOTON»; Росія, Новосибірський завод напівпровідникових приладів; Україна, м. Київ, філія заводу «FOTON».

УДК 621.3.049.776

Д. т. н. В. Г. СПИРИН

Россия, Арзамасский политехнический институт,
филиал Нижегородского технического университета им. Р. Е. Алексеева
E-mail: spvl49@mail.ru

МЕТОД ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ПЛАТЫ

Разработан метод оценки качества тонкопленочной платы, который основан на результатах измерения сопротивления резисторов и вычисления их инструментальных погрешностей. Применение данного метода позволяет увеличить выход годных плат в 1,5–2 раза.

Ключевые слова: тонкопленочный резистор, инструментальная погрешность сопротивления.

В большинстве датчиков первичной информации в России сервисную электронику выполняют в виде тонкопленочной микросборки. Это связано прежде всего с тем, что пассивные компоненты датчиков имеют большие габариты и их невозможно изготавливать по полупроводниковой технологии. Основной конструктивной единицей микросборки, которая во многом определяет ее качество, надежность и выход годных, является плата.

В процессе производства тонкопленочной платы используют два основных типа контроля: по внешнему виду и по параметрам пассивных элементов (резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности). Наиболее распространенным элементом платы является тонкопленочный резистор (ТПР). Ввиду высокой точности и стабильности, ТПР часто используют в датчиках и в измерительных системах или устройствах, например в выходных резисторах акселерометров, входных делителях мультиметров, измерительных мостах, резисторных матрицах АЦП и ЦАП. Количество ТПР на одной плате может достигать нескольких десятков и даже сотен. Качество изготовления платы определяется точностью попадания сопротивлений ТПР в заданный интервал допуска.

Измерение сопротивления большого количества резисторов платы вручную является трудоемким процессом. Для снижения трудоемкости и повышения достоверности измерений сопротивления ТПР в [1] предложена автоматизированная система контроля качества платы, в основе которой лежит измерение сопротивления резисторов тестовых схем, расположенных на периферийных технологических полях подложки. Далее по определенным алгоритмам производится расчет систематических и случайных погрешностей размеров ТПР. По рассчитанным значениям погрешностей дается заключение о годности платы.

Метод, рассмотренный в [1], является косвенным и, следовательно, ненадежным. Хотя

он и дает заключение о годности платы, это вовсе не означает, что сопротивление каждого резистора платы лежит в заданном поле допуска. Такие отклонения могут быть вызваны рядом причин, таких, например, как неравномерность напыления резистивного слоя по поверхности подложки, локальное подтравливание резистора, пористость подложки, проколы в фоторезисте и пр. То есть, в случае применения этого метода велика вероятность того, что на сборочную операцию может быть пропущена бракованная плата.

При проектировании и изготовлении плат не придают должного значения инструментальным погрешностям ТПР, хотя они снижают выход годных в 1,5–2 раза [2]. Инструментальные погрешности сопротивления ТПР в основном определяются комплектом фотошаблонов (ФС) и проявляются в том, что сопротивление одного или нескольких резисторов не попадает в заданное поле допуска. На воспроизводимость сопротивления ТПР, кроме технологического процесса изготовления ФС, могут оказывать влияние разработчик электрической принципиальной схемы, конструктор эскиза топологии, кодировщик. Все многообразие инструментальных погрешностей можно разделить на методические, субъективные и производственные погрешности при изготовлении ФС.

К методическим погрешностям можно отнести выбор разработчиком схемы номинального сопротивления ТПР по стандартному ряду, а не исходя из минимально возможных размеров ТПР, которые являются технологическим ограничением. Иногда это приводит к несоответствию сопротивления, изображенного на эскизе топологии ТПР, перечню элементов вследствие дискретности координатной сетки. Методические погрешности формируются из-за того, что применяемые математические модели расчета сопротивления ТПР и его погрешностей являются приближенными и не включают в себя особенности

конструкции ТПР, например сопротивления его электродов, а также систематические производственные погрешности, которые возникают в реальном технологическом процессе.

Субъективные погрешности в основном связаны с невнимательностью проектировщиков плат и фотошаблонов. Ошибки такого рода приводят, как правило, к неверному определению числа квадратов резистора.

Производственные погрешности при изготовлении фотошаблонов связаны с точностью оборудования и метода изготовления. Кроме того, инструментальную погрешность могут значительно увеличить неисправности оборудования, например фотонаборной установки.

Инструментальные погрешности обнаружить очень сложно, т. к. они маскируются производственными погрешностями. На сопротивление резисторов влияют два основных параметра: удельное поверхностное сопротивление ρ резистивной пленки и коэффициент формы K_ϕ . Поскольку сопротивление зависит от двух переменных, выявить причины появления инструментальных ошибок при получении заданных сопротивлений ТПР в процессе изготовления плат трудно. Отсюда возникает задача разработки алгоритма оценки инструментальных погрешностей, который позволил бы при каждом запуске платы по новым фотошаблонам простыми расчетами находить данный класс погрешностей.

Целью настоящей работы является разработка метода оценки качества тонкопленочной платы по результатам вычисления инструментальных погрешностей ТПР.

В [3] предложен алгоритм оценки инструментальных погрешностей. Данный метод основан на сопоставлении сопротивления исследуемого резистора с эталонным. Причем в качестве эталонного резистора выбирается входящий в состав платы ТПР с наибольшими размерами. Если такового не имеется, то проектируются технологические эталонные резисторы с размерами 0,5×0,5 мм. Недостатком данного метода является то, что технологические эталонные резисторы увеличивают трудоемкость проектирования платы и занимают ее площадь. Кроме того, данный метод отличается сравнительно невысокой точностью, т. к. основан только на исключении влияния удельного поверхностного сопротивления.

Если предположить, что систематические погрешности длины, ширины и сопротивления электродов ТПР скомпенсированы [4], можно предложить другой подход к выбору эталонного резистора, основанный на вычислении погрешности отношения сопротивлений двух ТПР. Согласно [5], эта погрешность в общем случае определяется выражением

$$\delta K = \delta \rho_{c1} - \delta \rho_{c2} + \sqrt{(\delta l_1 - \delta l_2)^2 + (\delta b_1 - \delta b_2)^2} + \delta K_d, \quad (1)$$

где индексы 1, 2 соответствуют резисторам R_1, R_2 ;

$\delta \rho_c$ — систематическая градиентная погрешность удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки резистора;

$\delta l, \delta b$ — случайные погрешности длины l и ширины b резистора;

δK_d — погрешность отношения сопротивлений двух ТПР, обусловленная точечными дефектами.

Если при проектировании платы исследуемый и эталонный резисторы расположить на расстоянии менее 5 мм друг от друга, то градиентной погрешностью можно пренебречь. В этом случае формула (1) принимает вид

$$\delta K = \sqrt{(\delta l_1 - \delta l_2)^2 + (\delta b_1 - \delta b_2)^2} + \delta K_d. \quad (2)$$

Как следует из этой формулы, погрешность отношения сопротивлений двух ТПР минимальна, если резисторы имеют идентичную форму и расположены в непосредственной близости друг от друга. В этом случае величина этой погрешности будет определяться точечными дефектами (обычно $\delta K_d = 1 - 3\%$). Однако на практике идентичность форм всех ТПР соблюдать невозможно. Тем не менее, можно предположить, что при некоторых условиях возможно приближение выражения (2) к минимальной погрешности.

Чтобы выявить эти условия, рассмотрим случайную погрешность коэффициента формы ТПР, которая описывается следующей формулой:

$$\delta K_\phi = \sqrt{\delta l^2 + \delta b^2} = \sqrt{(\Delta l / l)^2 + (\Delta b / b)^2}, \quad (3)$$

где $\Delta l, \Delta b$ — абсолютные случайные производственные погрешности длины и ширины ТПР.

Если $\delta l \geq 3\delta b$ или $\delta b \geq 3\delta l$, то меньшим слагаемым в формуле (3) можно пренебречь. Как показывают исследования [6], для структуры пленок РС-3710-V-Al $\Delta l \approx 2\Delta b$. В этом случае возможны две ситуации:

а) $2\Delta b / l \geq 3\Delta b / b$; откуда $l / b \leq 2/3$;

б) $\Delta b / b \geq 6\Delta b / l$; откуда $l / b \geq 6$.

Анализ формул (2), (3) показывает, что все резисторы, которые может содержать тонкопленочная плата, в зависимости от коэффициента формы $K_\phi = l/b$ можно разделить на несколько групп, причем каждую группу можно характеризовать собственным значением погрешности отношения сопротивлений.

Выявим условия минимума погрешности отношения сопротивлений двух ТПР для каждой группы ТПР:

1 группа — резисторы с примерно одинаковой шириной или с большой шириной. В этом случае $\delta l_1 - \delta l_2 > 3(\delta b_1 - \delta b_2)$;

2 группа — резисторы, размеры которых значительно отличаются друг от друга;

3 группа — резисторы с примерно одинаковой длиной или с большой длиной. В этом случае $\delta b_1 - \delta b_2 > 3(\delta l_1 - \delta l_2)$.

Очевидно, что в качестве эталонного предпочтительнее выбирать резистор из той же группы, что и исследуемый. В этом случае минимизируются случайные производственные погрешности изготовления ТПР и легко выявляются инструментальные. Наиболее сложно обеспечить минимальную погрешность отношения сопротивлений двух ТПР для резисторов второй группы. Следует отметить, что для ТПР этой группы производственная погрешность максимальна вследствие высокой зависимости их сопротивления от размеров. Поэтому для повышения выхода годных плат при их проектировании следует увеличить размеры тех ТПР второй группы, погрешность сопротивления которых не позволяет достигнуть заданного допуска. Это вполне допустимо, т. к. эти резисторы занимают небольшую площадь.

При изготовлении платы по новым ФШ необходимо определить те резисторы, сопротивление которых не попало в заданное поле допуска. Для каждого из исследуемых резисторов следует выбрать эталонный. В дальнейшем исследуемый резистор будем обозначать $R1$, а эталонный — $R2$.

Сформулируем требования к выбору эталонного резистора:

- эталонный резистор должен входить в состав платы, на которой расположен исследуемый резистор;
- измеренное сопротивление эталонного резистора должно соответствовать заданному допуску;
- коэффициенты формы исследуемого и эталонного резисторов должны соответствовать одной группе (см. таблицу) или находится на стыке групп;
- расстояние между исследуемым и эталонным резисторами по координате Y (малой стороне подложки) не должно превышать 5 мм. В этом случае разностью градиентной погрешности этих сопротивлений можно пренебречь.

Определение инструментальных погрешностей ТПР производят по следующему алгоритму:

1. По вышеописанной методике для каждого резистора платы определяют эталонный резистор, для чего резисторы группируют (см. таблицу). При этом использовать такие сочетания как « $R1$ — исследуемый, $R2$ — эталонный» и « $R2$ — исследуемый, $R1$ — эталонный» нельзя.
2. Задают значения δK_d (обычно $\delta K_d = 0,03$).

3. Вычисляют допустимую погрешность исследуемого резистора относительно эталонного по формулам из таблицы. Такая погрешность обусловлена параметрами этих ТПР, заданными в конструкторской документации.

4. Вычисляют фактическую относительную погрешность отношения сопротивлений исследуемого и эталонного резисторов

$$\delta K_{\text{и}} = (R1_{\text{и}}/R2_{\text{и}} - R1/R2)/(R1/R2) = (R1_{\text{и}}/R2_{\text{и}})/(R2/R1) - 1,$$

где $R1_{\text{и}}$, $R2_{\text{и}}$ — измеренные сопротивления резисторов платы;

$R1$, $R2$ — номинальные сопротивления этих же резисторов по конструкторской документации.

5. При наличии инструментальной погрешности ТПР выполняется следующее неравенство: $|\delta K_{\text{и}}| > \delta K$. (4)

Если неравенство (4) выполняется для какого-либо исследуемого резистора, то проводят анализ причин, вызвавших это отклонение, и принимают меры по их устранению. Анализ инструментальных погрешностей ТПР следует проводить при первом изготовлении тонкопленочной платы по новым ФШ. Этому анализу должны подвергаться также те платы, которые характеризуются низким процентом выхода годных в связи с непопаданием сопротивления какого-либо ТПР в заданный допуск.

По разработанному алгоритму произведена оценка инструментальных погрешностей спроектированной в ноябре 2004 г. платы УКВГ, на которой сформировано 47 резисторов. Размер платы составляет 45×29,5 мм. Первые образцы данной платы были изготовлены в апреле 2005 г. Для анализа инструментальных погрешностей ТПР необходим чертеж платы и результаты измерения сопротивлений. В связи с тем, что часть резисторов были подгонными и значения их сопротивления записывались только после проведения подгонки, эти резисторы анализу не подвергались.

На основании чертежа платы 6Ш7.100.429 и вышеизложенных рекомендаций была проведена группировка ТПР, и для каждого резистора был выбран эталонный.

Оценка инструментальных погрешностей проводилась при следующих исходных данных: $\Delta l = \pm 10$ мкм; $\Delta b = \pm 5$ мкм; $\Delta K_d = 0,03$; $\rho = 1$ кОм/□. Разность градиентной погрешности для всех исследуемых и эталонных ТПР принималась равной нулю.

По разработанным алгоритмам вычислялись допустимые и фактические отклонения сопротивлений исследуемых резисторов от эталонных.

В результате проведенных расчетов было установлено, что шесть резисторов из 47 имеют фактическое отклонение значений сопротивления вы-

Погрешность отношения сопротивлений двух ТПР в зависимости от коэффициента формы

Группа ТПР	Коэффициент формы	Формула для погрешности отношения сопротивлений группы
1	$0,01 \leq K_{\text{ф}} < 0,67$	$\delta K = \delta l_1 - \delta l_2 + \delta K_d$
2	$0,67 \leq K_{\text{ф}} \leq 6$	$\delta K = \sqrt{(\delta l_1 - \delta l_2)^2 + (\delta b_1 - \delta b_2)^2} + \delta K_d$
3	$K_{\text{ф}} > 6$	$\delta K = \delta b_1 - \delta b_2 + \delta K_d$

ше допустимого. Анализ показал, что для одного из резисторов такое отклонение вызвано несоответствием его номинального значения (6,2 кОм) реализованному в чертеже платы (6,0 кОм). Это ошибка схемотехника — он выбрал номинальное сопротивление этого резистора по стандартному ряду. Для других пяти резисторов каких-либо существенных отклонений в конструкторской документации найдено не было. Поэтому для этих резисторов был проведен расчет $\delta K_{\text{и}}$ по результатам измерения 12 плат. Дополнительный анализ показал следующее.

1. Большинство рассчитанных значений $|\delta K_{\text{и}}|$ меньше, чем δK , т. е. инструментальных погрешностей для этих резисторов нет.

2. Параметр $\delta K_{\text{и}}$ имеет как положительные, так и отрицательные отклонения, что свидетельствует о случайном характере отклонений.

3. Для каждого из пяти исследуемых резисторов в двух-трех случаях из двенадцати $|\delta K_{\text{и}}| > \delta K$, что, как выяснилось, стало результатом следующих промахов:

- результаты измерений записывались числами с недостаточным количеством значащих цифр после запятой — не более трех, а следовало бы четыре;
- при измерении сопротивления ТПР оператор допустил ошибку;
- во время выполнения технологических процессов напыления или фотолитографии на резистор попали инородные частицы;
- шероховатость подложки не регламентировалась;
- фотошаблоны были загрязнены;
- края элементов фотошаблонов не были достаточно четкими.

Выводы

В результате экспериментально-теоретического анализа инструментальных погрешностей сопротивления ТПР установлено, что для повышения выхода годных серийно изготавливаемых плат следует изменить размеры одного резистора. Проведенная практическая оценка показала высокую эффективность разработанных алгоритмов: применение данного метода позволяет увеличить процент выхода годных плат тонкопленочных микросборок в 1,5–2 раза.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Власов В. Е., Захаров В. П., Коробов А. И. Системы технологического обеспечения качества компонентов микроэлектронной аппаратуры. — Москва: Радио и связь, 1987. [Vlasov V. E., Zakharov V. P., Korobov A. I. Sistemy tekhnologicheskogo obespecheniya kachestva komponentov mikroelektronnoy apparatury. Moscow: Radio i svyaz', 1987]
2. Спирин В. Г. Оценка инструментальных погрешностей сопротивления тонкопленочного резистора // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении. Матер. Всероссийской НТК. — Н. Новгород — Арзамас, НГТУ — АФ НГТУ, 2003. — С. 363–365. [Spirin V. G. Otsenka instrumental'nykh pogreshnostei soprotivleniya tonkoplenochnogo rezistora // Progressivnye tekhnologii v mashino- i priborostroenii.

Mater. Vserossiiskoi NTK. N. Novgorod — Arzamas, NGTU — AF NGTU, 2003. P. 363]

3. Спирин В. Г. Методы определения коэффициента формы тонкопленочных резисторов при проектировании и изготовлении гибридных интегральных схем // Технология авиационного приборо- и агрегатостроения. Производственно-технический сборник. — 1990. — Вып. 2. — С. 66–68. [Spirin V. G. // Tekhnologiya aviatsionnogo priboro- i agregatostroeniya. Proizvodstvenno-tekhnicheskii sbornik. 1990. Iss. 2. P. 66]

4. Спирин В. Г. Компенсация систематических погрешностей тонкопленочных элементов через элементы фотошаблона // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2004. — № 4. — С. 9–11. [Spirin V. G. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2004. N 4. P. 9]

5. Спирин В. Г., Ямпурин Н. П. Исследование погрешностей функций тонкопленочных резисторов // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении. Матер. Всероссийской НТК. — Н. Новгород — Арзамас, НГТУ — АФ НГТУ, 2003. — С. 358–362. [Spirin V. G., Yampurin N. P. Issledovanie pogreshnostei funktsii tonkoplenochnykh rezistorov // Progressivnye tekhnologii v mashino- i priborostroenii. Mater. Vserossiiskoi NTK. N. Novgorod — Arzamas, NGTU — AF NGTU, 2003. P. 358]

6. Спирин В. Г. Оценка производственных погрешностей тонкопленочных элементов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2004. — № 4. — С. 50–53. [Spirin V. G. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2004. N 4. P. 50]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 05.03 2012 г.*

Spirin V. G. Method for evaluating the quality of thin-film board.

Keywords: thin-film resistor, resistance instrumental error.

A method for estimation of the quality of a thin-film board has been developed, based on the results of resistance measuring and instrumental errors calculation. Recommendations are given for the exclusion of gross errors in the application of the method. The practical estimation carried out shows the high efficiency of the developed algorithms. This method allows to increase the boards yield by 1,5–2 times.

Russia, Arzamas Polytechnical Institute, a branch of the R. E. Alekseev Nizhny Novgorod Technical University.

Спирін В. Г. Метод оцінки якості тонкоплівкової плати.

Ключові слова: тонкоплівковий резистор, інструментальна похибка опору.

Розроблено метод оцінки якості тонкоплівкової плати, який заснований на результатах вимірювання опору резисторів і обчислення їх інструментальних похибок. Дано рекомендації по виключенню грубих промахів при застосуванні методу. Проведена практична оцінка показує високу ефективність розроблених алгоритмів. Застосування даного методу дозволяє збільшити вихід придатних плат в 1,5–2 рази.

Росія, Арзамаський політехнічний інститут, філія Нижегородського технічного університету ім. Р. Є. Алексєєва.

УДК 539.2

Д. ф.-м. н М. И. САМОЙЛОВИЧ¹, д. ф.-м. н. А. Б. РИНКЕВИЧ²,
 Dr. Sc. В. БОВТУН³, д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН¹, Dr. Sc. Д. НУЖНЫЙ³,
 Dr. Sc. М. КЕМПА³, к. ф.-м. н. М. Ю. ЦВЕТКОВ¹, к. з.-м. н. С. М. КЛЕЩЕВА¹

Россия, г. Москва, ¹ЦНИТИ “Техномаш”, г. Екатеринбург, ²Институт физики металлов УрО РАН;
 Чешская республика, г. Прага, ³Институт физики АН ЧР
 E-mail: samoylovich@technomash.ru

НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ С КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ФЕРРОТОРОИДАЛЬНЫМИ МУЛЬТИФЕРРОИКАМИ

Изучены оптические, магнитные и диэлектрические свойства, состав и строение образцов наноконкомпозитов на основе решетчатых упаковок наносфер SiO_2 (опаловых матриц), содержащих в межсферических нанополостях кластеры кристаллических фаз материалов, относящихся к мультиферроикам ферротороидального типа.

Ключевые слова: наноконкомпозиты, метаматериалы, магнитные и диэлектрические характеристики.

Изучение мультиферроиков — магнитоупорядоченных структур тороидального типа (ФТО или ферротороидально упорядоченные системы) — началось сравнительно недавно. Их получение и исследование является актуальным, поскольку материалы и метаматериалы на основе мультиферроиков перспективны для устройств, использующих различные магнито- и электрооптические эффекты. Предполагается, что благодаря эффекту спонтанного намагничивания под действием локального электрического поля (наряду с возникновением поляризации в магнитных полях) мультиферроподобные материалы тороидального типа найдут широкое применение как в микроэлектронике и в различных сенсорных устройствах, так и в новом, развивающемся направлении — спиновой электронике (спинтронике). Кроме того, имеются все основания предполагать появление разработок устройств управления фазовыми скоростями и диаграммами электромагнитного излучения в оптическом, СВЧ- и ТГц-диапазонах с использованием подобных материалов [1, 2]. Особенно привлекательно выглядят результаты работ в области исследований мультиферроидных материалов в виде упорядоченных 3D-нанорешеток с использованием кристаллитов (размерами 15–40 нм) мультиферроиков ферротороидального типа упорядочения, в частности, таких как LiCoPO_4 ,

LiNiPO_4 , LiCuO_2 , InFeO_3 или InMnO_3 (изоструктурные GaFeO_3).

Многочисленные работы, проводимые научными коллективами в различных странах, по получению и изучению мультиферроиков ферротороидального типа различного состава указывают на то, что большинство из исследованных материалов малоприспособны для практического применения, поскольку они не всегда обладают свойством спонтанного намагничивания (или поляризации), проявляют необходимые свойства только при низких температурах или характеризуются значительно меньшими (на два или более порядков), чем это необходимо, значениями основных параметров.

По всей видимости, решить проблему создания систем, работоспособных в области комнатных температур, позволит разработка новых типов подобных мультиферроидных метаматериалов с использованием ранее разработанной технологии получения высококачественных решетчатых упаковок наносфер SiO_2 размерами 180–380 нм [3–8]. С целью понимания и контроля особенностей взаимосвязи электрических и магнитных параметров таких материалов требуется проведение фундаментальных исследований в части изучения распространения электромагнитных волн в них, а также их диэлектрических, электрооптических, магнитооптических, магнитных и других характеристик.

Образцы для исследований

Образцами для исследований служили наноконкомпозиты на основе решетчатых упаковок наносфер SiO_2 , межсферические нанополости которых заполнены мультиферроиками торо-

Авторы благодарны А. В. Королеву (ЦКП ИФМ УрО РАН) за проведение магнитных измерений наноконкомпозитов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант офи-м-2011 №11-02-12095) и Президиума РАН, а также Научного фонда ЧР P204/12/0232).

идального типа — LiCoPO_4 , LiNiPO_4 , LiCuO_2 и другими.

Вначале были изготовлены высококачественные 3D решетчатые упаковки наносфер SiO_2 объемом $2\text{--}3\text{ см}^3$ с размерами монокристаллических областей до $0,1\text{ мкм}^3$ и однородностью по диаметру наносфер не хуже $3\text{--}5\%$. При этом применялись специально разработанные методики упрочнения опаловых матриц, что позволило проводить их механическую обработку для достижения необходимых размеров и шероховатости поверхностей образцов.

Композиционные образцы на основе полученных опаловых матриц получали жидкофазным методом — заполнением (пропиткой) межсферических нанополостей необходимыми веществами с последующим отжигом при температурах от 400° до 1000°C .

С целью формирования в межсферических нанополостях кристаллических фаз материалов, относящихся к мультиферроикам — LiNiPO_4 , LiCoPO_4 , LiCuO_2 , в качестве пропитывающих растворов различной концентрации использовали:

- раствор соли $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ в ортофосфорной кислоте (H_3PO_4) и водный раствор $\text{LiNO}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$;
- раствор соли $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ в ортофосфорной кислоте (H_3PO_4) и водный раствор $\text{Li}(\text{NO}_3)_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$;
- водный раствор солей $\text{LiNO}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$;
- растворы солей Li_3PO_4 и $\text{Ni}_3(\text{PO}_4)_2$ в ортофосфорной кислоте с добавлением аммиака;
- растворы солей Li_3PO_4 и $\text{Co}_3(\text{PO}_4)_2$ в ортофосфорной кислоте с добавлением аммиака.

Отметим, что синтезированные в межсферических полостях опаловых матриц вещества могут находиться в рентгеноаморфном и кристаллическом состояниях, при этом требуемые функциональные характеристики композитов определяются только кристаллическими фазами.

Фазовый состав и структурные особенности нанокомпозитов

Основной структурной особенностью ферротороидальных структур является тороидальное упорядочение спинов (рис. 1, 2). Классическая кристаллография в принципе не способна отображать симметрию таких объектов, которая определяется сборкой симплицальных (клеточных) комплексов из топологических структурных элементов, и только полученные симметрии [9] позволяют отображать закономерности упорядочения электронной подсистемы в мультиферроиках.

Фазовый анализ выполнялся как до, так и после отжига образцов, с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-3М (CuK_α -излучение, графитовый монохроматор; без вращения образца величина шага $0,02^\circ$, с вращением образца в непрерывном режиме 1° в минуту).

Рентгенодифракционный анализ каждого полученного образца показал следующее. Фаза

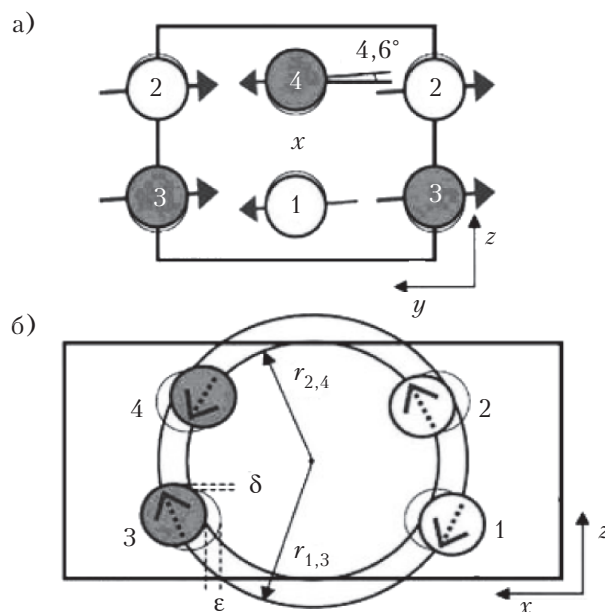


Рис. 1. Упорядочение спинов ионов Co^{2+} на yz -плоскости (а) и xz -плоскости (б) для основного состояния кристаллического мультиферроика состава LiCoPO_4

(закрашенные и незакрашенные кружки соответствуют ионам Co для координат $x \approx 3/4$ и $x \approx 1/4$ соответственно; серыми стрелками показаны спиновые компоненты ионов Co [10])

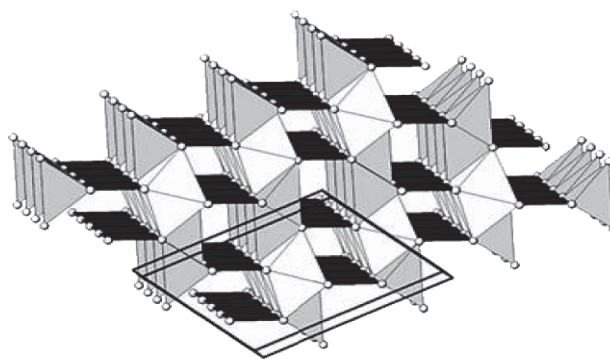


Рис. 2. Наличие двухцепочечных лестничных подструктур (two-leg ladder systems [10]) в структуре Li_2CuO_2

LiCuO_2 (моноклинная сингония, пространственная группа C2/m) синтезируется в образцах опаловых матриц при температурах отжига $T_0 = 750\text{--}1000^\circ\text{C}$. В зависимости от T_0 помимо LiCuO_2 также образуются фазы SiO_2 (кварц — гексагональная сингония, P3_121), CuO (моноклинная сингония, Cc) и Li_2O (кубическая сингония, Fm-3m) (рис. 3, а). Кристаллическая фаза LiCuO_2 начинает формироваться при температуре выше 750°C , и ее концентрация увеличивается с ростом температуры, при этом активизируется процесс рекристаллизации SiO_2 и уменьшается концентрация фазы CuO . В области температуры 800°C формируется фаза Li_2O . Ана-

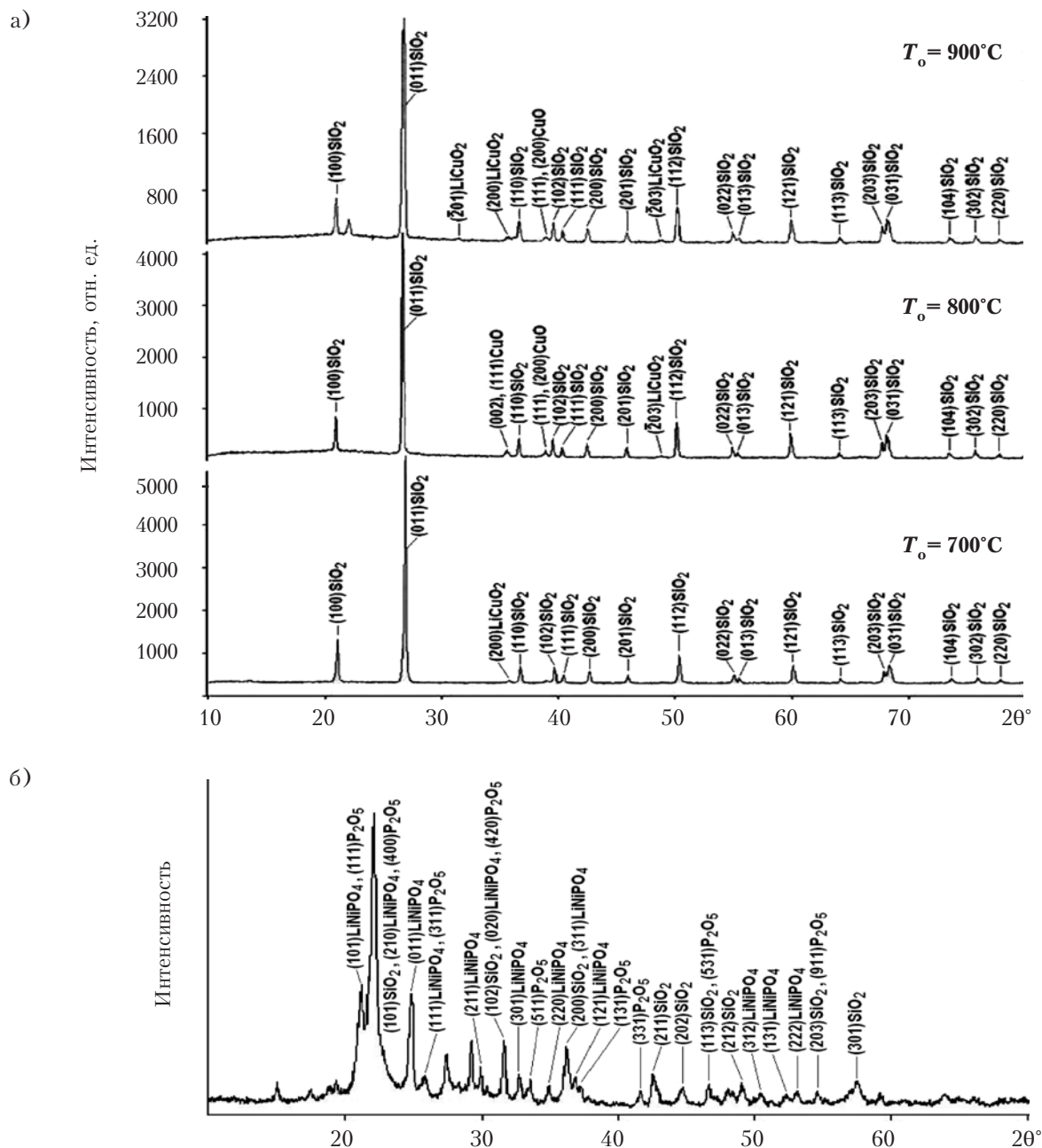


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы ($\text{CuK}\alpha$ -излучение) образцов с нанополостями, заполненными различными соединениями:

а — на основе Li и Cu (LiCuO_2 и др.), синтезированных при различных температурах; *б* — на основе Li, Ni и P (LiNiPO_4 и др.)

логичные результаты фазообразования наблюдаются при синтезе кристаллических фаз на основе лития и никеля (фосфаты): было синтезировано соединение $\text{LiNi}_2(\text{P}_3\text{O}_{10})$ (моноклинная сингония, $\text{P}2_1/\text{m}$) (AFM-структура), а сравнительно небольшие концентрации LiNiPO_4 наблюдались (рис. 3, б) только при использовании в качестве растворителя смеси ортофосфорной кислоты и аммиака.

При температурах отжига 700–900°C в образцах опаловых матриц была синтезирована фаза LiCoPO_4 (орторомбическая сингония,

Pnma), а также, в зависимости от T_0 , фазы SiO_2 (моноклинная сингония), SiO_2 (кристобалит) (тетрагональная сингония, $\text{P}4_12_12$); $\text{Co}_3(\text{PO}_4)_2$ (моноклинная сингония, $\text{P}2_1/\text{b}$); (рис. 4).

Установлено, что кристаллическая фаза LiCoPO_4 начинает формироваться при температурах выше 500°C, а ее концентрация максимальна в образцах опаловых матриц, отожженных при температурах выше 800°C. Найдены варианты пропиток и термообработок, обеспечивающие получение в нанополостях однофазной системы (кристаллической фазы LiCoPO_4).

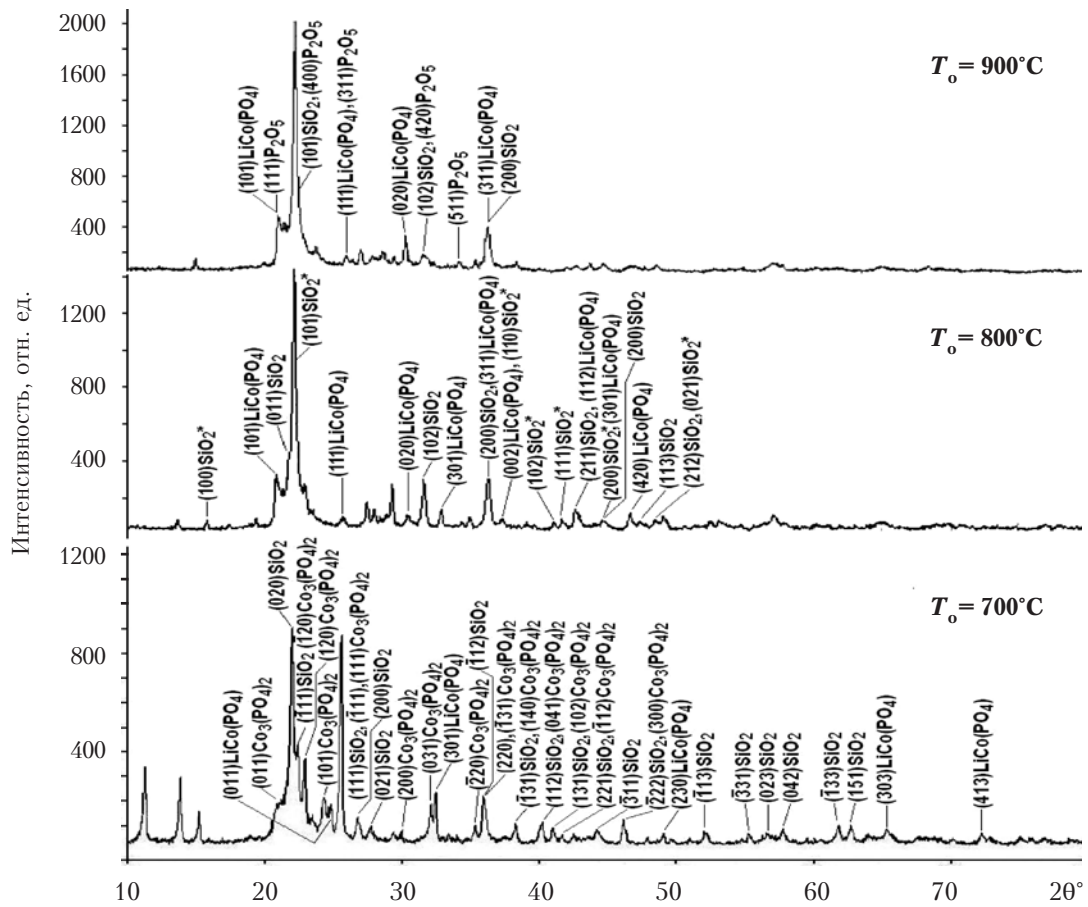


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы ($\text{CuK}\alpha$ -излучение) образцов с нанополостями, заполненными соединениями на основе Li, Co и P (LiCoPO_4 и др.)

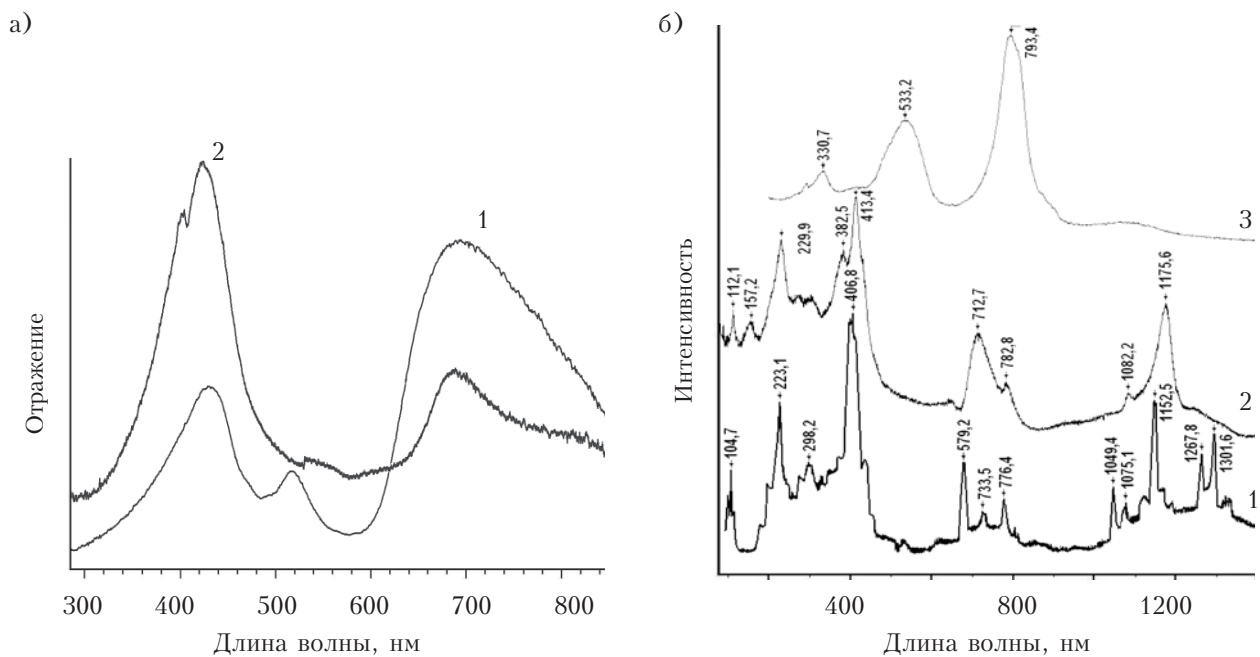


Рис. 5. Спектры отражения (а) и КРС (б) образцов с наночастицами LiCoPO_4 (1), LiNiPO_4 (2), а также Li + Cu(CuO) (3)

Следует отметить, что нами также проводились работы по заполнению опаловых матриц такими соединениями, как InFeO_3 и InMnO_3 (изоструктурные GaFeO_3) с использованием в качестве растворителя оксида индия и нитрата железа, водных растворов соляной кислоты различной концентраций. Однако здесь пока еще не удалось получить однофазные системы, т. е. содержащие только, например, InFeO_3 (различные фазы SiO_2 , немагнитные и электрически не активные, не в счет).

Оптические, диэлектрические и магнитные характеристики образцов

Результаты исследований оптических характеристик — спектров отражения и комбинационного рассеяния света (КРС) в оптическом диапазоне — приведены на рис. 5. Исследования проводились с помощью микрорамановского спектрометра LabRam HR800 (HORIBA Jobin-Yvon) и спектрофотометра UV-3600 (Shimadzu).

При исследовании диэлектрических параметров были получены частотные зависимости реальной (ϵ') и мнимой (ϵ'') компонент диэлектрической проницаемости образцов опаловых

матриц, межсферические нанополости которых были заполнены перечисленными веществами с размерами кластеров 15–30 нм (рис. 6). Диэлектрические спектры были изучены в широком диапазоне частот — от 1 МГц до 2 ТГц — с использованием микроволновых и терагерцевого методов. Измерения в диапазоне высоких частот ($1 \cdot 10^6$ – $1,8 \cdot 10^9$ Гц) были проведены с использованием диэлектрического спектрометра с коаксиальной измерительной ячейкой Novocontrol BDS 2100 и импедансным анализатором Agilent 4291B. В микроволновой области ($2 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^{10}$ Гц) измерения проводились методом коаксиального зонда с открытым концом (Agilent 8507E), для чего использовали сетевой анализатор Agilent E8364B, а в области ТГц — методом трансмиссионной ТГц спектроскопии с использованием фемтосекундной Тi-сапфировой лазерной системы [6, 7]. Коаксиальные измерения ($1 \cdot 10^6$ – $1,8 \cdot 10^9$ Гц) проводились на образцах в форме цилиндров (диаметр 3 мм, высота 4–5 мм), все остальные измерения проведены на образцах в форме пластин размерами 10×10 мм и толщиной 1–3 мм. Все измерения проведены без нанесения электродов на образцы.

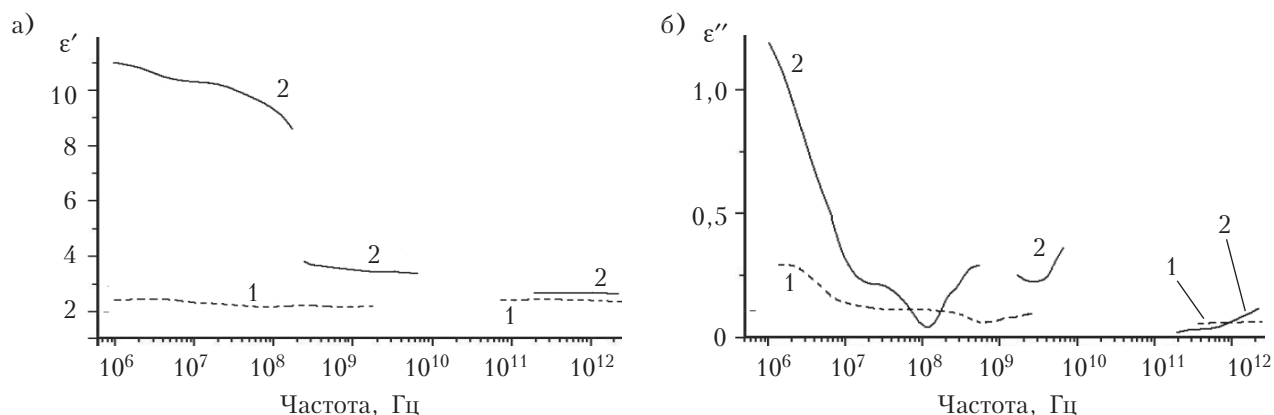


Рис. 6. Частотные зависимости ϵ' (а) и ϵ'' (б) образцов опаловых матриц до пропитки (1) и заполненных кластерами LiCoPO_4 (2)

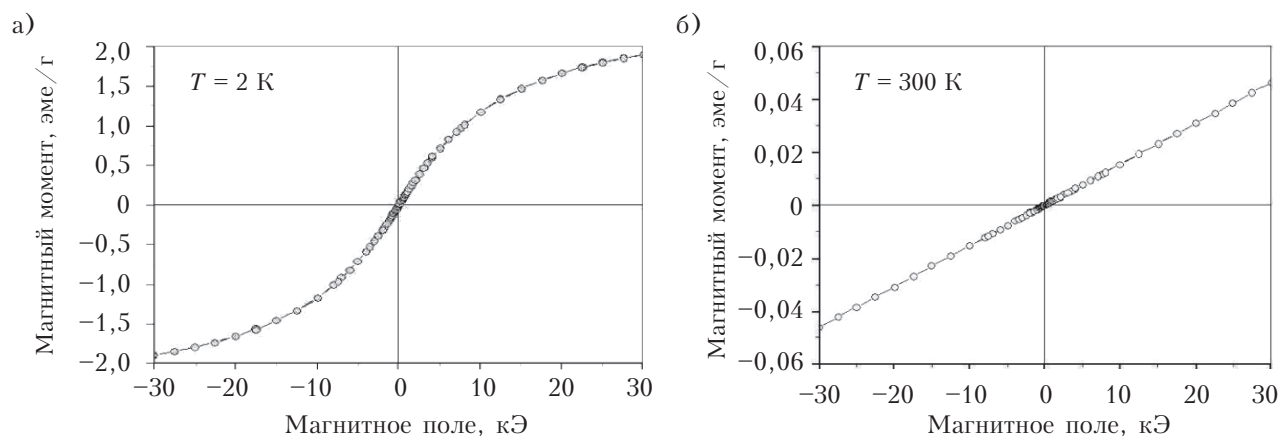


Рис. 7. Петля гистерезиса (а) и кривая намагничивания (б) образца с наночастицами LiCoPO_4

Диэлектрическая проницаемость ϵ' всех исследованных опаловых матриц, нанополости которых заполнены перечисленными кристаллическими фазами, выше, чем значения ϵ' для незаполненной матрицы. Во всем приведенном диапазоне частот проявляется диэлектрическая дисперсия, характерная для композитных материалов, при этом ϵ' незначительно понижается с увеличением частоты. Как видно из рис. 6, б, мнимая компонента диэлектрической проницаемости (а значит, и диэлектрические потери) возрастает как в сторону низких частот ($f < 10$ МГц), так и в сторону ТГц частот. Немонотонный характер некоторых частотных зависимостей ϵ'' частично может быть объяснен экспериментальными неточностями (вследствие неконтролируемой шероховатости поверхности, формы и толщины образцов, отсутствия электродов и т. д.), а частично возможным влиянием магнитных свойств изучаемых материалов.

Осуществление эффективного воздействия микроволновых полей на наночастицы металлов представляет интерес как для нахождения условий существования отрицательной действительной части магнитной проницаемости, так и для применения исследуемых материалов в электронных приборах сверхвысоких частот. Анализ результатов проводился с учетом фазового состава, структурного и магнитного состояния материала для отбраковки образцов.

Магнитные измерения выполнялись на образцах опаловых матриц с наночастицами LiCoPO_4 на установке MPMS-XL (Quantum Design) в интервале напряженности магнитного поля H до 30 кЭ в температурном диапазоне от 2 до 300 К. Измерены кривые намагничивания и петли гистерезиса, а также температурные зависимости магнитной восприимчивости и магнитного момента образцов в поле напряженностью 10 кЭ.

Анализ кривых намагничивания (рис. 7) позволяет предположить совместное присутствие ферромагнитных и суперпарамагнитных свойств композитов. Последние можно объяснить при-

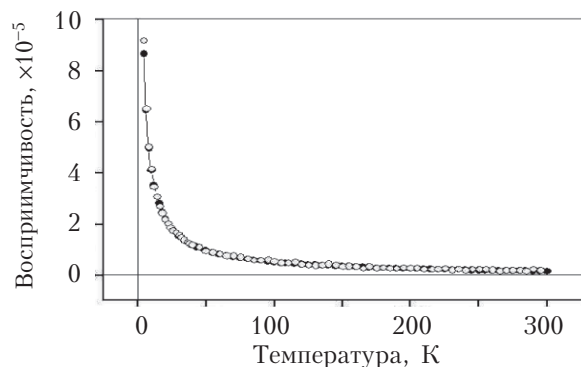


Рис. 8. Температурные зависимости магнитной восприимчивости образца с наночастицами LiCoPO_4 , измеренные в поле напряженностью 10 кЭ на постоянном токе (—●—) и на частоте 1000 Гц (—○—)

существом наночастиц металлов малых размеров (10–15 нм).

Полное совпадение данных по магнитной восприимчивости, измеренной на постоянном токе и на частоте 10 кГц (рис. 8), говорит о том, что на переменном токе не наблюдается вклада от связанных зарядов, которые могли бы возникнуть за счет магнитоэлектрического эффекта.

Как видно из рис. 9, прямой ход температурной зависимости действительной части магнитного момента практически совпадает с обратным, а результаты измерений этого параметра в

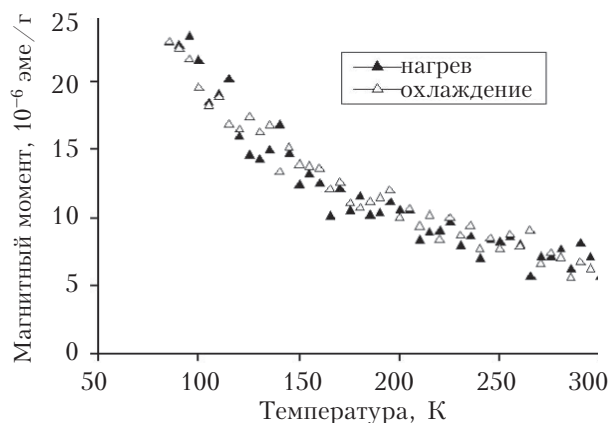


Рис. 9. Прямой и обратный ход температурной зависимости действительной части магнитного момента образца с наночастицами LiCoPO_4 , измеренные на частоте 1000 Гц

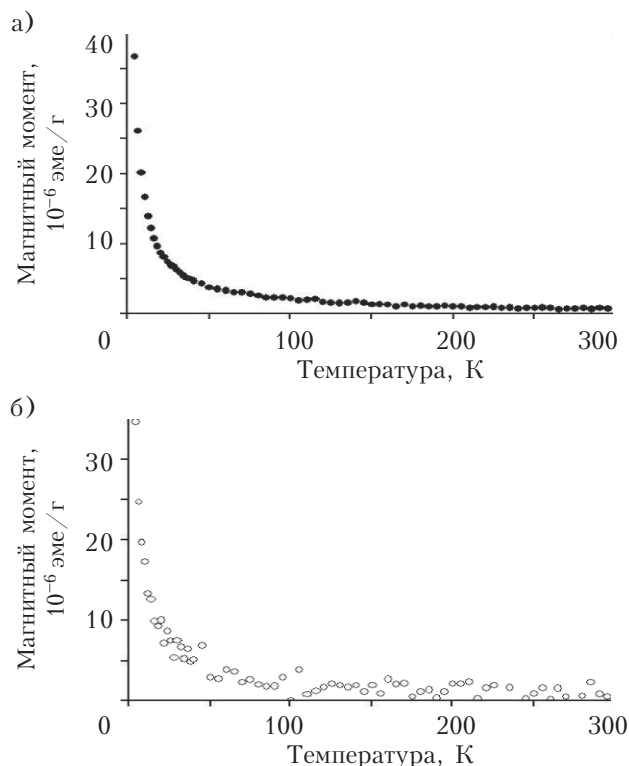


Рис. 10. Температурная зависимость действительной части магнитного момента образца с наночастицами LiCoPO_4 , измеренная в поле 4 Э (а) и 0,4 Э (б)

поле с напряженностью 0,4 Э идентичны полученным при 4 Э, но имеют больший разброс значений (рис. 10).

Заключение

Проведенные исследования оптических, магнитных и диэлектрических свойств, состава и строения образцов нанокompозитов на основе решетчатых упаковок наносфер SiO_2 , содержащих в межсферических нанополостях кластеры кристаллических фаз материалов, относящихся к мультиферроикам ферротороидального типа, показали их перспективность для создания устройств, использующих различные магнито- и электрооптические эффекты.

В дальнейшем планируется провести теоретические и экспериментальные исследования различных образцов нанокompозитов для объяснения различных наблюдаемых особенностей, например, особенностей структурной и спиновой модели объемного спин-упорядочения ферротороидального типа, в частности для LiCoPO_4 — соединения с пока еще плохо объясненной микроскопической моделью.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Sarychev A. K., Shalaev V. M. *Electrodynamics of metamaterials*. — World Scientific and Imperial College Press, 2007.
2. Kong J. A. *Electromagnetic wave interaction with stratified negative isotropic media* // *Progress In Electromagnetics Research*. — 2002. — Vol. 35. — P. 1–52.
3. Наноматериалы. III. Фотонные кристаллы и нанокompозиты на основе опаловых матриц / Под ред. М.И.Самойловича. — Москва: Техномаш, 2007. [Nanomaterialy. III. Fotonnye kristally i nanokompozity na osnove opalovykh matrits / Pod red. M.I.Samoilovicha. Moscow: Tekhnomash, 2007]
4. Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Клещева С. М., Цветков М. Ю. Особенности фазовых превращений и кристаллизации в нанополостях решетчатых упаковок наносфер SiO_2 // *Наука и технологии в промышленности*. — 2010. — № 4. — С. 73–84. [Samoilovich M. I., Belyanin A. F., Kleshcheva S. M., Tsvetkov M. Yu. // *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti*. 2010. N 4. P. 73]
5. Ustinov V. V., Rinkevich A. B., Perov D. V. et al. Anomalous magnetic antiresonance and resonance in ferrite nanoparticles embedded in opal matrix // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. — 2012. — Vol. 324. — P. 78–82.
6. Nuzhnyy D., Vanek P., Petzelt J. et al. Properties of BaTiO_3 confined in nanoporous Vycor and artificial opal // *Proc. Appl. Ceram.* — 2010. — Vol. 4. — P. 215–223.
7. Самойлович М. И., Бовтун В., Ринкевич А. Б. и др. Пространственно-неоднородные материалы на основе решетчатых упаковок наносфер SiO_2 // *Инженерная физика*. — 2010. — № 6. — С. 29–38. [Samoilovich M. I., Bovtun V., Rinkevich A. B. i dr. // *Inzhenernaya fizika*. 2010. N 6. P. 29]
8. Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В. и др. СВЧ-характеристики, микроволновая проводимость и диэлектрические свойства нанокompозитов на основе опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей металлами // *Наноинженерия*. — 2012. — № 3. — С. 22–30. [Samoilovich M. I., Rinkevich A. B., Bovtun V. i dr. // *Nanoinzheneriya*. 2012. N 3. P. 22]
9. Самойлович М. И., Талис А. Л. Кристаллические мультиферроики и симметричные особенности их магнитных подсистем // *Нано- и микросистемная техника*. — 2012. — № 1. — С. 31–36. [Samoilovich M. I., Talis A. L. // *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2012. N 1. P. 31]
10. Wang K. F., Liu J.-M., Ren Z. F. Multiferroicity: the coupling between magnetic and polarization orders // *Adv. in Phys.* — 2009. — Vol. 58, N 4. — P. 321–448.

Дата поступления рукописи
в редакцию 14.05 2012 г.

Samoilovich M. I., Rinkevich A. B., Bovtun V., Belyanin A. F., Nuzhnyy D., Kempa M., Tsvetkov M., Kleshcheva S. M. **Nanocomposites based on opal matrices with crystalline multiferroics of ferrothorite type.**

Keywords: nanocomposites, meta-materials, magnetic and dielectric properties.

Optical, magnetic and dielectric properties, composition and structure of nanocomposites samples based on lattice packing SiO_2 nanospheres (opal matrices) with included clusters of crystalline phase of multiferroics of ferrothorite type in interspherical nanospacing has been studied.

Russia, Moscow, CRTI “Technomashrbcnfk”, Ekaterinburg, Institute of Metal Physics Ural Division of RAS; Czech Republic, Prague, Institute of Physics of the ASCR.

Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В., Белянин О. Ф., Нужный Д., Кемпа М., Цветков М. Ю., Клещева С. М. **Нанокompозити на основі опалових матриць з кристалічними ферротороїдальними мультиферроїками.**

Ключові слова: нанокompозити, метаматеріали, магнітні та діелектричні характеристики.

Вивчено оптичні, магнітні та діелектричні властивості, склад та будову зразків нанокompозитів на основі ґратчастих упаковок наносфер SiO_2 (опалових матриць), що містять в міжсферичних нанополостях кластери кристалічних фаз, що відносяться до мультиферроїків ферротороїдального типу.

Росія, м. Москва, ЦНДТІ “Техномаш”, м. Єкатеринбург, Інститут фізики металів УрВ РАН; Чеська республіка, м. Прага, Інститут фізики АН ЧР.

УДК 621.382

Х. С. АЛИЕВА

Азербайджан, г. Баку, Национальное аэрокосмическое агентство
a.xumar555@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛЕНОК ФТАЛОЦИАНИНА МЕДИ НА ИХ СВОЙСТВА

Исследования показали, что пленки фталоцианина меди, обладая совокупностью уникальных свойств, могут успешно применяться в качестве газочувствительных покрытий резистивных структур. Толщина пленки, в отличие от температуры, не является определяющим фактором для получения высокой чувствительности. Относительно низкая рабочая температура таких структур позволяет эксплуатировать газодетекторы в экономичном режиме.

Ключевые слова: газочувствительный элемент, резистивная структура, напыление пленок, детектирующие характеристики фталоцианина меди.

Структуры, способные изменять свою проводимость под действием внешних факторов широко применяются в качестве чувствительных элементов (**ЧЭ**) газодетекторов. Это в основном металлоксидные полупроводники. Наряду с ними большой интерес представляют ЧЭ на основе проводящих полимеров, используемые в качестве сенсоров проводимости. Такие материалы, как полипиролл, полиимиды, фталоцианины, относительно селективны, работают при более низких по сравнению с металлоксидными полупроводниками температурах. Чаще всего в качестве ЧЭ с полимерными покрытиями рассматриваются резистивные элементы с фталоцианиновыми пленками. Предел обнаружения у таких элементов может достигать долей ppm [1].

Фталоцианины меди упоминаются в литературе как наиболее перспективные и интересные материалы для использования в газочувствительных элементах. Это объясняется их высокой хемо- и термостойкостью, относительной доступностью, электронным типом проводимости, низкой рабочей температурой.

Электрофизические и индикационные свойства фталоцианинов меди, как и других полимерных материалов, сильно зависят от условий и режимов их получения, термообработки, режимов измерения и многих других факторов.

В настоящей работе изучалось влияние температуры и толщины пленок фталоцианина меди (тетра-3-октадецилсульфоил фталоцианина меди) на свойства ЧЭ на их основе.

Для создания резистивных ЧЭ применялась микроэлектронная технология. На полированной с двух сторон изолирующей подложке из сапфира методом двухсторонней фотолитографии с одной стороны формировался резистивный нагреватель, который одновременно выпол-

нял и роль датчика температуры, а с другой — встречно-штыревой гребенчатый резистор. Расстояние между токоведущими дорожками — 20 мкм. Для металлизации встречно-включенных гребешков и нагревателя использовали никель с подслоем ванадия. Толщина слоя металлизации — 0,4–0,5 мкм.

На гребешки методом вакуумного термического напыления наносили пленки фталоцианина меди. Для контроля их толщины в камеру помещали кварцевые микровесы. Пленка наносилась одновременно на образец и на пластину кварцевого резонатора весов. Толщина пленок варьировалась в диапазоне 0,08–0,8 мкм.

В ходе предварительных экспериментов были выбраны оптимальные режимы получения пленок (температура подложки, температура испарителя, степень вакуума) с наиболее высокой воспроизводимостью их характеристик.

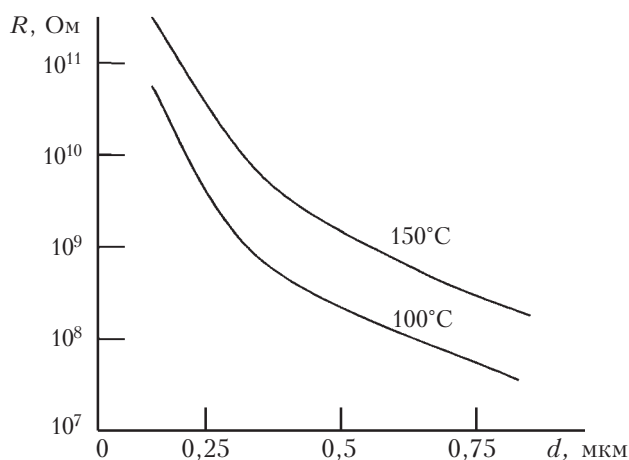


Рис. 1. Зависимость сопротивления пленок фталоцианина меди от их толщины при разной температуре

Исследования электрических параметров пленок проводили при напряжении U менее 10 В, поскольку при $U > 10$ В наблюдался сильный временной дрейф сопротивления R .

Полученные экспериментальные результаты показали, что зависимость R от толщины образца носит нелинейный характер (рис. 1). Было также установлено, что временной дрейф сопротивления наблюдается и при напряжениях менее 10 В, причем величина дрейфа зависит от температуры.

На рис. 2 приведены температурные зависимости временного дрейфа сопротивления пленок различной толщины, измеренные при $U = 5$ В (R_{0T} , R_T — сопротивление пленки при температуре T , соответственно, сразу после ее установления и через 10 мин; $(R_T - R_{0T})/R_{0T}$ — временной дрейф сопротивления при температуре T). Как видно из рисунка, с уменьшением толщины пленки величина дрейфа увеличивается. Практически во всем исследованном температурном диапазоне дрейф положителен, т. е. $R_T > R_{0T}$ (сопротивление со временем растет). Однако с ростом T дрейф уменьшается, и при определенной температуре его знак меняется на противоположный, т. е. далее $R_T < R_{0T}$ (сопротивление уменьшается). Температура, при которой происходит инверсия знака дрейфа, меньше для более толстых пленок. Следует отметить качественное изменение сопротивления пленки толщиной 0,08 мкм, которое наблюдается при температуре выше 220°C. По всей вероятности, оно связано с разрывами пленки на рельефах структуры, т. к. разница между толщиной слоя металлизации и толщиной исследуемой пленки достаточно велика.

Аналогичные результаты были получены и для пленок фталоцианина кремния в [2].

Из температурных зависимостей было определено значение энергии активации проводимости. Для пленок толщиной порядка 0,08 мкм, осажденных в атмосфере с повышенным содержанием

кислорода, энергия активации проводимости составляла 1,2–1,4 эВ. Для более толстых пленок, осажденных в вакууме $3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., значения энергии активации составляли 0,8–1,0 эВ и возрастали после высокотемпературной термообработки.

Для «свежеприготовленных» образцов резистивных структур характерна высокая чувствительность к оксидам азота (NO_x). После снятия воздействия газа даже при комнатной температуре сопротивление менее чем за минуту восстанавливается на 80% от исходного значения, для полной же десорбции необходимо увеличить температуру. Однако после термообработки при температуре 180°C начинают происходить качественные изменения свойств пленок: уменьшается чувствительность, увеличивается сопротивление, а время его восстановления растет (см. рис. 3, где I_0 — ток до воздействия газа, I — ток при воздействии NO_x). Термообработка при 230°C также не приводит к уменьшению времени восстановления, но при этом еще больше увеличивается сопротивление образца.

Следует отметить, что согласно [3], при термообработке даже до 100°C в результате структурных изменений наблюдаются изменения свойств пленки фталоцианина меди — увеличение времени отклика, уменьшение сопротивления и чувствительности к NO_2 . Влияние температуры на свойства пленок фталоцианина меди рассматривалось и в [4]: при температурах выше 200°C наблюдался переход материала из α -фазы в β -фазу, соответственно изменялись и свойства пленки — увеличивался размер зерна, увеличивалось сопротивление, уменьшался дрейф параметров. В [5] наблюдались изменения свойств таких пленок при температуре выше 225°C: ухудшалась чувствительность, но уменьшалось время восстановления после воздействия оксидов азота. В [6] было установлено, что при температуре, как и в нашем случае, выше 180°C происходили качественные изменения свойств

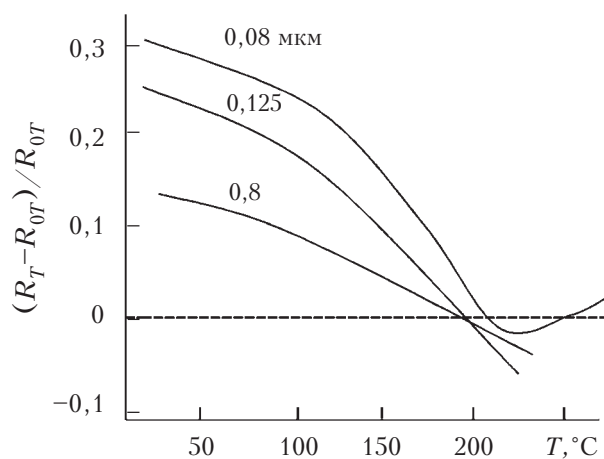


Рис. 2. Температурная зависимость дрейфа сопротивления пленок разной толщины (в мкм)

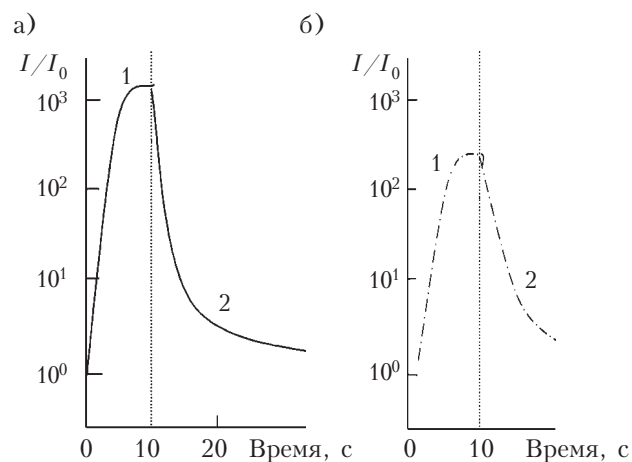


Рис. 3. Динамика процессов адсорбции (1) и десорбции (2) NO_x до термообработки (а) и после термообработки пленки при 180°C (б)

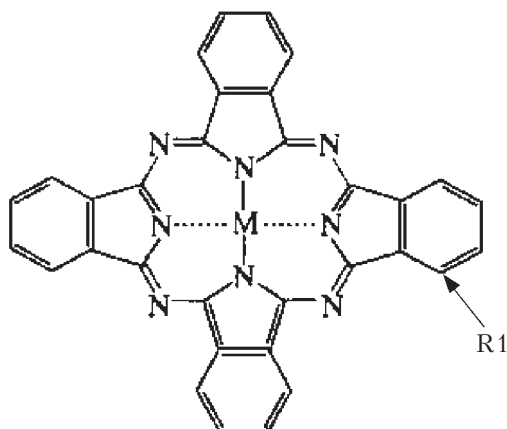


Рис. 4. Структурная формула тетра-3-октадецилсульфо-
моил фталоцианина меди M-Cu, R1=SO₂-NH-C₁₈H₃₇

пленки фталоцианина меди — изменялись фотопроводимость и энергия активации проводимости.

В процессе исследований с помощью кварцевых микровесов по изменению резонансной частоты пластины была зафиксирована температура, при которой начинало происходить изменение массы пленки фталоцианина меди на пластине. Эта температура оказалась порядка 175°C. Поскольку с полиформизмом материала это не связано (при такой температуре фталоцианин не испаряется), можно предположить, что происходит уход слабо связанной с каркасом структурной формулы сульфомоильной группы (рис. 4), поэтому и изменяются свойства пленки. По-видимому, именно с этой группой связаны низкое сопротивление и высокая чувствительность к оксидам азота, а ее уход приводит к изменению проводимости, ухудшению чувствительности и другим качественным изменениям пленки. Так, для тетра-tert-бутил-фталоцианина меди после ухода соответствующих периферийных групп чувствительность становится практически на порядок меньше, а сопротивление пленки при неизменной толщине — в несколько раз больше.

В процессе напыления пленок были опробованы два режима. В первом случае напыление материала на подложку проводилось практически сразу. Во втором случае держатель с подложкой сначала был закрыт заслонкой, а испаритель с фталоцианином в течение нескольких минут прогревался при высокой температуре (350°C). По истечении некоторого времени заслонку открывали, и производили напыление фталоцианина на подложку. В обоих случаях температура подложка была комнатной.

Пленки, полученные в первом случае, были более чувствительны к оксидам азота и имели меньшее сопротивление, чем во втором. Это подтверждает предположение, что именно сульфомоильной группой обусловлена высокая чувствительность и низкое сопротивление: при таком

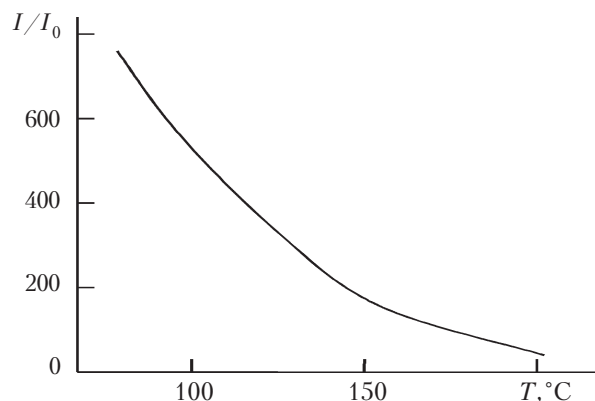


Рис. 5. Зависимость газочувствительности пленки
толщиной 0,08 мкм от температуры при концентра-
ции NO_x 3 ppm

напылении фталоцианин, не успевая разложиться, вместе с периферийной группой осаждается на подложку. При втором способе напыления при высокой температуре эта группа испаряется, и на подложку попадает фталоцианин меди без периферийных групп.

Чувствительность образцов к оксидам азота с ростом температуры резко уменьшается. Это видно на рис. 5. Для пленок, прошедших термообработку при температуре не выше 160–170°C в течение нескольких часов, характерна высокая чувствительность к оксидам азота при практически отсутствующем отклике на другие газы. Термообработка необходима для предотвращения изменения свойств пленки в процессе работы, когда повышают температуру для ускорения десорбции.

Для пленок толщиной 0,08 мкм, осажденных в атмосфере с повышенным содержанием кислорода, установлена способность обнаруживать оксиды азота на уровне менее 1 ppm.

Исследования показали, что газочувствительность мало зависит от толщины пленки и что с увеличением толщины несколько увеличивается время десорбции после воздействия оксидов азота, однако при этом улучшаются стабильность и воспроизводимость параметров.

Исследования тетра-3-октадецилсульфо-моил фталоцианина меди показали, что этот материал, обладая совокупностью уникальных свойств — низким сопротивлением, высокой чувствительностью и селективностью к оксидам азота, может успешно применяться в качестве газочувствительных покрытий резистивных структур.

Толщина пленки, в отличие от температуры, не является определяющим фактором для получения высокой чувствительности к оксидам азота, однако для получения стабильных и воспроизводимых результатов, относительно малого времени десорбции, удобства технологических процессов (во избежание разрывов плен-

ки на граничных участках) она должна составлять от 0,5 до 0,7 мкм.

Температура эксплуатации резистивных элементов на основе рассмотренных пленок не должна быть выше 170°C — чтобы не происходил уход периферийной группы, обуславливающей низкое сопротивление и высокую газочувствительность, но не ниже 60°C — чтобы исключить влияние влаги на чувствительный элемент. Такой низкий диапазон рабочих температур фталоцианина меди, в отличие от других фталоцианinov, делает использование чувствительных элементов на основе этого материала в газодетекторах экономичным с точки зрения энергопотребления.

Сравнение полученных результатов с опубликованными данными по фталоцианинам меди указывает на то, что в каждом конкретном случае и для каждого типа фталоцианина необходимо подбирать свои оптимальный режим получения пленок и конкретные условия работы в составе чувствительного элемента.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Brunet J., Parra Garcia V., Pauly A. et al. An optimised gas sensor microsystem for accurate and real-time measurement of nitrogen dioxide at ppb level. // *Sensors and Actuators: B. Chemical.* — 2008. — Vol. 134, iss. 2. — P. 632–639.
2. Алиева Х. С., Сулейманов С. С., Муршудли М. Н. Газочувствительные элементы на основе пленок SiPcCl₂ // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* — 2010. — № 2. — С. 58–61. [Алиева Х. С., Suleymanov S. S., Murshudli M. N. // *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparaturne.* 2010. N 2. P. 58]
3. Yuh-Lang Lee, Chi-Hsiu Chang. NO₂ sensing characteristics of copper phthalocyanine films: effects of low temperature annealing and doping time // *Sensors and Actuators: B. Chemical.* — 2007. — Vol. 119, iss. 1. — P. 174–179.
4. Padma N., Aditee Joshi, Ajay Singh et al. NO₂ sensors with room temperature operation and long term stability using copper phthalocyanine thin films // *Sensors and Actuators: B. Chemical.* — 2009. — Vol. 143, iss. 1. — P. 246–252.
5. Yuh-Lang Lee, Chuan-Yi Hsiao, Rung-Hwa Hsiao. Annealing effects on the gas sensing properties of copper

phthalocyanine films // *Thin Solid Films.* — 2004. — Vol. 468, iss. 1–2. — P. 280–284.

6. Toyohide Tanaka, Mitsuki Matsuoka, Ryo Hirohashi. Modulated photocurrent of evaporated copper phthalocyanine thin films // *Thin Solid Films.* — 1998. — Vol. 322, iss. 1–2. — P. 290–297.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 24.04 2012 г.*

Alieva H. S. Effect of thickness and temperature of copper phthalocyanine films on their properties.

Keywords: gas-sensitive element, resistive structure, coating films, detecting characteristics of copper phthalocyanine.

The research has shown that copper phthalocyanine films, having a set of unique properties, can be successfully used as gas-sensitive coating of resistive structures. The thickness of the film, in contrast to its temperature, is not the determining factor for high sensitivity. Low operating temperature of structures with copper phthalocyanine films allows to exploit them in economy mode.

Azerbaijan, Baku, National Aerospace Agency.

Алієва Х. С. Вплив товщини плівок фталоціаніну міді та температури на їх властивості.

Ключові слова: газочутливий елемент, резистивна структура, напильованні плівок, детектувальні характеристики фталоціаніну міді.

Дослідження показали, що плівки фталоціаніну міді, володіючи сукупністю унікальних властивостей, можуть з успіхом застосовуватися як газочутливі покриття резистивних структур. Товщина плівки, на відміну від температури, не є визначальним чинником для отримання високої чутливості. Відносно низька робоча температура таких структур дозволяє експлуатувати газодетектори у економічному режимі.

Азербайджан, м. Баку, Національне аерокосмічне агентство.

НОВЫЕ КНИГИ

Айхлер Ю., Айхлер Г. И. Лазеры. Исполнение, управление, применение. — Москва: Техносфера, 2012. — 496 с.

Перевод нового (седьмого) издания базового учебника издательства «Шпрингер» по основам лазерной оптики содержит новейшие сведения о высокоомощных диодных и твердотельных лазерах для ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучений. Рассмотрены волоконные лазеры, ультракороткие световые импульсы, рентгеновские лучи и световые импульсы от лазеров на свободных электронах, а также их применение в медицинской диагностике и биофотонике. В книге затрагиваются следующие вопросы: функции, типы и свойства лазерного излучения, типы лазеров, оптические компоненты и управление лазерным излучением, применение лазеров в технологии обработки материалов, медицине, измерениях и передаче данных. Простота и доступность изложения делает книгу прекрасным пособием не только для специалистов, но и для студентов и преподавателей профильных вузов.



К. т. н. А. П. АЛИЕВА¹, д. т. н. Ф. К. АЛЕСКЕРОВ², к. ф.-м. н. С. Ш. КАХРАМАНОВ²,
С. А. НАСИБОВА¹, Е. Д. МОРОЙДОР³, М. ПИШКИН³

¹Азербайджанский технический университет, ²НПО «Селен» НАН АР, г. Баку, Азербайджан;

³Стамбульский технический университет «Йылдыз», Турция

E-mail: almaz46@mail.ru

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ МЕЖСЛОЕВЫХ КВАНТОВЫХ НИТЕЙ В ЛЕГИРОВАННОМ ЦИНКОМ Bi_2Te_3

Изучен процесс формирования нанонитей на поверхности (0001) Bi_2Te_3 . Установлено, что в плоскости $\text{Te}^{(1)}-\text{Te}^{(1)}$ происходит процесс миграции атомов, перемещение и коагуляция кластеров на основе атомов Zn. В результате диффузионно-ограниченной агрегации формируются структуры с квантовыми точками, из которых самоорганизуются нанонити. Такие поверхностные структуры определяют свойства разрабатываемых топологических изоляторов на основе соединений $\text{A}_2^{\text{V}}\text{B}_3^{\text{VI}}$ и увеличивают термоэлектрическую эффективность композита.

Ключевые слова: квантовые точки и нити, миграция атомов, морфология, топологический изолятор, кластеры, диффузия, агрегация.

Слоистые кристаллы $\text{A}_2^{\text{V}}\text{B}_3^{\text{VI}}$ известны как материалы, широко используемые в термоэлектричестве. Обнаруженные в них топологически защищенные состояния выделены в новый вид конденсированного состояния вещества — топологический изолятор, что превратило их в интенсивно исследуемые объекты. Перспектива использования спинового состояния электронов в приповерхностной области этих материалов в качестве носителя единицы информации может стать более доступной при использовании в технологии эффектов самоорганизации наноструктур. Процессы структурной перестройки, протекающие на поверхности кристаллов, играют особую роль при получении систем пониженной размерности, таких как квантовые точки и нити. Примеси определенного вида, не воздействуя радикальным образом на химическую и электронную структуру слоев, выбрасываются в межслоевое пространство, где образуют наноструктуры различной размерности и формы: двумерные — плоскости, одномерные — нити или нульмерные — квантовые точки, которые можно использовать для управления межслоевым расстоянием. Перенос заряда по нитям, плоскостям и туннелирование заряда через квантовые точки соответствуют теории движения жидкости Латтинжера [1, 2], как и краевые состояния квантового спинового эффекта Холла, индуцированные двумерными электронными состояниями, образующимися при раздвижении слоев. Транспорт заряда в объеме слоев имеет характер движения жидкости Ферми. Ранее в [3–6] сообщалось о формировании таких межслоевых наноструктур, как двумерные примесные слои, образующие сверхрешетки и одномерные каналы протекания заряда, и о влиянии их на кинетические параметры. Выстраивание примесных кластеров в массив квантовых точек на поверхности (0001) кристалла яв-

ляется интересным с точки зрения управления свойствами материала.

Целью настоящей работы было изучение процессов формирования межслоевых нанонитей при выстраивании кластеров в плоскости $\text{Te}^{(1)}-\text{Te}^{(1)}$ на поверхности (0001) слоистого кристалла Bi_2Te_3 , легированного Zn. Исследования проводили посредством атомно-силовой микроскопии (АСМ) (на сканирующем зондовом микроскопе марки Солвер НЕКСТ) и рентгенодифрактометрии (на дифрактометре фирмы Philips Panalytical X'Pert Pro XRD).

При проведении исследований изучались следующие вопросы:

- выявление взаимодействия примесей и образования отдельных межслоевых соединений;
- вероятность встраивания агрегированных атомов в разные точки плоскости $\text{Te}^{(1)}-\text{Te}^{(1)}$;
- выявление механизмов роста наночастиц, закономерностей динамики изменения размеров нанобъектов и их распределения при анализе профилограмм;
- выявление самоорганизованных структур, подобных квантовым точкам и нитям.

Установлено, что диффузионные процессы приводят к сближению отдельных малых наночастиц и образованию контактов между ними. Могут взаимодействовать два, три и более нанобразований (квантовых точек). В плоскости $\text{Te}^{(1)}-\text{Te}^{(1)}$ Bi_2Te_3 формируются нанобъекты различной геометрии, такие как неупорядоченные слоистые структуры и наноступени, упорядоченные наноступени и наноступени малых размеров, подобные квантовым точкам, а также упорядоченные линейные фигуры, подобные квантовым нитям. На полученных АСМ-изображениях видны островковые скопления примесей (рис. 1).

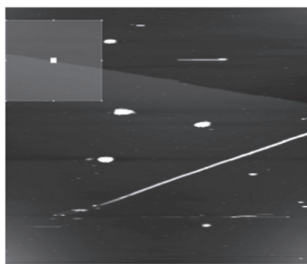


Рис. 1. АСМ-изображение коагулированных наноструктур $\text{Bi}_2\text{Te}_3\langle\text{Zn}\rangle$ в структуре $\text{Bi}_2\text{Te}_3\langle\text{Zn}\rangle$

Поскольку цинк относится к примесям, обладающим малым ионным радиусом, при легировании его атомы легко диффундируют в межслоевое пространство халькогенидов висмута и сурьмы. Это подтверждают приведенные АСМ-фотографии цепочки отдельных наноструктур (рис. 1) и квантовых точек (КТ), сформировавшихся нанонити.

Миграция и взаимодействие кластеров приводит к образованию квантовых нитей в рамках процесса роста «снизу-вверх». Основной причиной, вызывающей образование напряженных островков на поверхности, является релаксация упругих напряжений на краях слоев и взаимодействие островков посредством напряжений, создаваемых ими в кристалле. Форма КТ может значительно изменяться в процессе зародивания или постростового отжига. На рис. 1 виден конечный результат динамики формирования больших островков из малых и сформированных из КТ линейных образований, которые можно назвать квантовыми нитями. Одна из квантовых нитей сформирована из кластеров высотой до 80 нм и размером у основания порядка 90 нм (рис. 2).

В результате диффузионных процессов в межслоях кристалла $\text{A}_2\text{B}_3\text{VI}$ формируются нанобъекты различных форм и размеров. При внедрении легкодиффундирующих примесей Cu, Ni, Fe, Zn, Ag, Se происходит двумерный рост, для примесей Sb, In характерен механизм формирования трехмерных нанобъектов. Качественное и визуальное описание морфологических осо-

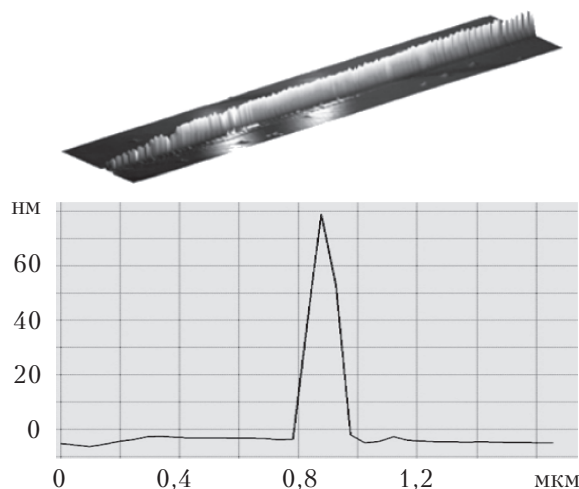


Рис. 2. Изображение нанонити и профилограмма одного из ее поперечных сечений

бенностей самоорганизованных наноразмерных структур выявило степень их упорядоченности. Динамика формирования нанофрагментов такова, что первоначально возникают наноструктуры, подобные КТ. В дальнейшем в процессе эволюции островки могут соединяться, образуя перемычки, сохраняя при этом свою форму и высоту, или могут формироваться новые объемные структуры сложной формы. Во всех случаях в качестве характеристического выступает не линейный размер нитей, а размер структурного элемента — подобия квантовой точки, не зависящий от вида примесей.

В процессе самоорганизации в плоскости $\text{Te}^{(1)} - \text{Te}^{(1)}$ формируется упорядоченный массив наноструктур (квантовых точек). Агрегация частиц приводит к уменьшению плотности распределения КТ и к возникновению нанобъектов больших размеров. Электронно-микроскопические снимки показали, что нанобъекты формируются из наноструктур в процессе диффузии при температурах выше 500 К. Внедряясь главным образом в межслоевое пространство, примеси создают объемные периодические сверхструктуры, состоящие из массивов квантовых точек между слоями теллуридных квинтетов, которые вследствие этого раздвигаются. Усиление анизотропии при самоорганизации КТ приводит к увеличению роли «изгибных» колебаний в упругих колебаниях кристалла, определяющих его тепловые свойства. О роли этой специфической ветви колебаний кристалла, называемых акустическими, и их поведении в слоистых кристаллах согласно теории Лифшица [7] сообщалось в [8]. Изгибная ветвь соответствует колебаниям, распространяющимся в плоскости слоев со смещениями атомов в направлении, перпендикулярном слоям, и дает основной вклад в теплоперенос. Характер температурной зависимости теплоемкости слоистых кристаллов различен в разных диапазонах температуры. Чем больше анизотропия кристалла, тем значительнее роль изгибной ветви в «мембранном» эффекте (росте частоты изгибных колебаний при растяжении слоев), приводящем к отрицательному тепловому расширению в плоскости слоев. Наблюдаемые в настоящих исследованиях аномалии кинетических параметров происходили в области линейного температурного роста теплоемкости кристалла, где доминирует вклад изгибных колебаний. Рассеяние этой фононной ветви у основания КТ, которые химически связаны с теллуридными квинтетами, приводит к термализации уровней КТ с последующим туннелированием заряда. Эта область, в которой теплоемкость пропорциональна квадрату температуры T^2 , а коэффициент теплопроводности пропорционален T^{2+x} (где x может определяться процессами туннелирования, т. е. размерами и плотностью скопления КТ), отмечается как область тепловой аномалии. Отметим, что спад решеточной фононной составляющей теплопроводности в этой области может несколько ком-

пенсироваться увеличением электронной составляющей теплопроводности, обусловленной туннельным током, который представляет собой жидкость Латтинжера. Термоэлектрическая эффективность исследуемых образцов выше, чем нелегированных, по-видимому, за счет снижения общей теплопроводности композита «квинтетные слои — нанонити» при увеличении роли рассеяния фононов колебания слоев на границах нанонитей. В этих процессах доминируют фононы, соответствующие изгибным колебаниям, имеющие квадратичный вид дисперсии. Агрегированные структуры, соединенные друг с другом непрерывной цепочкой кластеров, обеспечивают туннелирование заряда по проводящим каналам. Кластеры, формирующие нанонити, уширяют ван-дер-ваальсово пространство, не разрушая топологически защищенные состояния [9], смещают их во внутренний квинтет [10].

Экспериментальный выбор температурного режима отжига легированных кристаллов позволил получить межслоевые наноструктуры требуемой размерности и высотой до 80 нм. Установлено, что миграция и диффузионно-ограниченная агрегация атомов приводит к коагуляции одномерного ряда кластеров на основе атомов Zn, а релаксация упругих напряжений на дефектных центрах и взаимодействие кластеров — к формированию нанонитей. Такие поверхностные структуры определяют свойства разрабатываемых топологических изоляторов на основе соединений $A_2^V B_3^{VI}$ и увеличивают термоэлектрическую эффективность композита.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Fogler M. M., Malinin S. V., Nattermann T. Coulomb blockade and transport in a chain of one-dimensional quantum dots // Phys. Rev. Lett. — 2006. — Vol. 97, N 9, P. 096601.
2. Kane C. L., Fisher M. P. A. Thermal Transport in a Luttinger Liquid // Phys. Rev. Lett. — 1996. — Vol. 76, N 17. — P. 3192—3195.
3. Алескеров Ф. К., Кахраманов С. Ш., Кахраманов К. Ш. Межслоевые нанообразования в системе $Bi_2Te_3<Zn>$ // Сб. Термоэлектрики и их применения. — С-Пб., 2010. — С. 247—252. [Aleskerov F. K., Kakhramanov S. Sh., Kakhramanov K. Sh. // Sb. Termoelektriki i ikh primeneniya. S-Pb., 2010. S. 247]
4. Георгобiani А. Н., Пашаев А. М., Тагиев Б. Г., Алескеров Ф. К., Тагиев О. Б., Кахраманов К. Ш. Процесс роста и самоорганизации нанофрагментов на межслоевых поверхностях слоистых кристаллов $A_2^V B_3^{VI}$ // Неорган. материалы. — 2011. — Т. 47, № 12, С. 1447—1452. [Georgobiani A. N., Pashaev A. M., Tagiev B. G., Aleskerov F. K., Tagiev O. B., Kakhramanov K. Sh. // Neorgan. materialy. 2011. Vol. 47, N 12, P. 1447]
5. Алескеров Ф. К., Кахраманов К. Ш., Кахраманов С. Ш. Перколяционный эффект в кристаллах Bi_2Te_3 , легированных медью или никелем // Неорган. материалы. — 2012. — Т. 48, № 5, С. 536—541. [Aleskerov F. K., Kakhramanov K. Sh., Kakhramanov S. Sh. // Neorgan. materialy. 2012. Vol. 48, N 5, P. 536]
6. Алескеров Ф. К., Кахраманов С. Ш., Дерун Е. М. и др. Некоторые особенности формирования нанообъектов в межслоевом пространстве кристаллов типа Bi_2Te_3 // Fizika, Azerbaijan. — 2007. — Т. XIII, № 4. — С. 41—45. [Aleskerov F. K., Kakhramanov S. Sh., Derun E. M. i dr. // Fizika, Azerbaijan. 2007. Vol. XIII, N 4. P. 41]
7. Лифшиц И. М. О тепловых свойствах цепных и слоистых структур при низких температурах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1952. — Т. 22, вып. 4. — С. 475—486. [Lifshits I. M. O teplovykh svoystvakh tsepykh i sloistykh struktur pri nizkikh temperaturakh // Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki. 1952. Vol. 22. Iss. 4. P. 475]
8. Абдуллаев Н. А., Сулейманов Р. А., Алджанов М. А., Алиева Л. Н. О роли изгибных колебаний в процессах теплопереноса в слоистых кристаллах // Физика твердого тела. — 2002. — Т. 44, № 10. — С. 1775—1779. [Abdullaev N. A., Suleimanov R. A., Aldzhanov M. A., Alieva L. N. // Fizika tverdogo tela. 2002. Vol. 4, N 10. S. 1775]
9. Kundu A., Zazunov A., Yeyati A. L. et al. Energy spectrum and broken spin-surface locking in topological insulator quantum dots // Phys. Rev. B. — 2011. — Vol. 83, N 12. — P. 125429.
10. Меньшикова Т. В., Еремеев С. В., Чулков Е. В. О происхождении состояний двумерного электронного газа на поверхности топологических изоляторов // Письма в ЖЭТФ. — 2011. — Т. 94, № 2. — С. 110—115. [Men'shikova T. V., Eremeev S. V., Chulkov E. V. // Pis'ma v ZhETF. 2011. Vol. 94, N 2. P. 110]

Дата поступления рукописи
в редакцию 31.01 2012 г.

Alieva A. P., Aleskerov F. K., Kakhramanov S. Sh., Nasibova S. A., Moroidor E. D., Pishkin M. **The mechanism of formation of the interlayer quantum wires in zinc-doped Bi_2Te_3 .**

Keywords: quantum dots, nanowires, migration of atoms, morphology, topological insulators, clusters, diffusion, aggregation.

Nanowires formation process on a (0001) surface of Bi_2Te_3 is studied. It has been established that on interlayer surface $Te^{(1)}-Te^{(1)}$ there is a process of migration of atoms, moving and coagulation of clusters on the basis of Zn atoms. As a result of diffusion-limited aggregation the structures with quantum dots are formed, from which nanowires are self-organized. Such superficial structures play regulating role in working out the topological insulators based on $A_2^V B_3^{VI}$ and increase thermoelectric efficiency of a composite.

Azerbaijan Technical University, the NGO «Selen» NAS RA, Baku, Azerbaijan; Istanbul Technical University "Yildiz", Turkey.

Алієва А. П., Алескеров Ф. К., Кахраманов С. Ш., Насібова С. А., Моройдор Є. Д., Пішкін М. **Механізм формування міжшарових квантових ниток в легованому цинком Bi_2Te_3 .**

Ключові слова: квантові точки та нитки, міграція атомів, морфологія, топологічний ізолятор, кластери, дифузія, агрегація.

Вивчено процес формування нанониток на поверхні (0001) Bi_2Te_3 . Встановлено, що у площині $Te^{(1)}-Te^{(1)}$ відбувається процес міграції атомів, переміщення і коагуляція кластерів на основі атомів Zn. В результаті дифузійно-обмеженої агрегації формуються структури з квантовими точками, з яких самоорганізуються нанонитки. Такі поверхневі структури відіграють регулюючу роль при розробці топологічних ізоляторів на основі сполук $A_2^V B_3^{VI}$ і збільшують термоелектричну ефективність композиту.

Азербайджанський технічний університет, НВО «Селен» НАН АР, Баку, Азербайджан; Стамбульський технічний університет «Йилдиз», Туреччина.

УДК 621.36:004.94

К. ф.-м. н. Р. Г. ЧЕРКЕЗ¹, Д. Д. ДЕМЬЯНЮК²

Украина, г. Черновцы, ¹ЧНУ имени Юрия Федьковича, ²Институт термоэлектричества
radionch@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОНИЦАЕМОГО ТЕРМОЭЛЕМЕНТА

Предложена конструкция проницаемого термоэлемента для охлаждения и нагрева газа или жидкости. Представлены значения энергетических характеристик термоэлемента из полупроводниковых материалов на основе Bi—Te—Se—Sb. Результаты исследований показали возможность обеспечения температурного перепада 5—15°C при охлаждении или нагреве воздуха с энергетической эффективностью, превышающей на 5—9% возможности традиционных термоэлектрических элементов.

Ключевые слова: термоэлектричество, термоэлементы, проницаемые материалы, холодильный коэффициент, отопительный коэффициент.

Известны термоэлементы, в которых теплообмен между источником и стоком тепла происходит не только на спаях, но и в объеме материала ветвей [1]. Вариантами реализации таких моделей являются проницаемые термоэлементы, в ветвях которых вдоль направления протекания электрического тока имеются каналы (поры) для пропускания теплоносителя. Управляя условиями теплообмена (скоростью теплоносителя, интенсивностью теплообмена и т. п.) в сочетании с возникающими при этом в материале ветвей термоэлектрическими эффектами, можно влиять на энергетическую эффективность преобразования энергии.

Теоретические исследования проницаемых термоэлементов (ТЭ) для охлаждения потоков газов и жидкостей [2, 3] показали, что их применение позволяет повысить холодильный коэффициент на 30—40% по сравнению с возможностями традиционных ТЭ. Это указывает на перспективность использования прямого безмашинного термоэлектрического способа охлаждения, который, как известно [4], характеризуется простотой конструкции, высокой надежностью в работе, экологической чистотой, высокой точностью регулирования температурного режима и т. д.

Однако практическая реализация проницаемых ТЭ связана с определенными материальными и технологическими трудностями, которые побуждают к поиску более простых вариантов физических моделей преобразователей с внутренним теплообменом. Одним из таких вариантов являются проницаемые плоскостные термоэлементы, в которых каждая ветвь состоит из определенного количества пластин, расположенных на расстоянии друг от друга. Промежутки между пластинами являются каналами, по ко-

торым прокачивается теплоноситель (жидкость или газ). Компьютерное моделирование таких ТЭ [5] показало на возможность повышения холодильного коэффициента на 20—30% по сравнению с возможностями традиционных ТЭ. Однако информации об экспериментальных исследованиях таких термоэлементов авторам не встречалось.

В настоящей работе экспериментально исследованы проницаемые плоскостные термоэлементы и определены их энергетические характеристики в режиме охлаждения и нагрева воздуха.

Конструкция проницаемого термоэлемента

На рис. 1 представлена физическая модель исследуемого ТЭ и его конструкция. Термоэлемент состоит из веток *n*- и *p*-типов проводимости на основе материалов Bi—Te—Se—Sb, образованных из пластин 1, покрытых антидиффузионными слоями никеля, медных электрокоммутационных шин 2, соединяющих пластины ветки 1 по холодной поверхности; теплообменника из меди 3, покрытого антидиффузионным слоем никеля и коммутирующего пластины ветки по теплой стороне термоэлемента. Теплообменник 3 содержит систему каналов 4 для прокачки по ним теплоносителя, отводящего тепло от ТЭ и систему каналов 5 для теплоносителя, который необходимо охладить. Каналы 6, созданные плоскостями веток ТЭ 1, электрокоммутационными шинами 2 вместе с каналами теплообменника 5 образуют систему сквозных каналов для прокачки по ним охлаждаемого теплоносителя.

Прохождение электрического тока соответствующей полярности через ветки ТЭ вызывает подогрев верхнего теплообменника 3 и охлаждение электрокоммутационных шин 2. Пропуска-

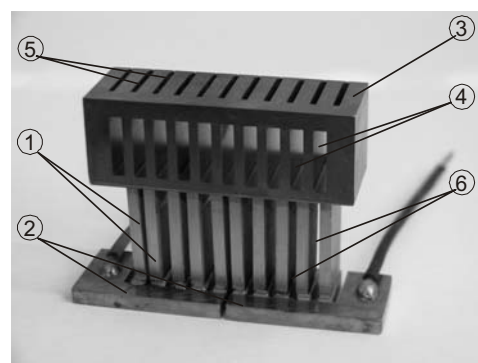
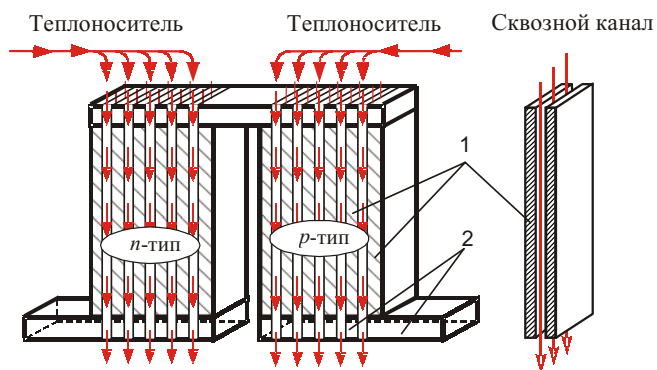


Рис. 1. Физическая модель и конструкция проникаемого термоэлемента

ние жидкого или газообразного теплоносителя, например воды или воздуха, через систему сквозных каналов 5, 6 приводит к его охлаждению благодаря теплообмену с боковой, более холодной поверхностью веток 1.

Методика и результаты экспериментальных исследований

Исследование проникаемого термоэлемента проводилось на стенде, схема которого представлена на рис. 2. Для создания потока воздуха через ТЭ 1 использованы аэродинамическую труба 13 с вентилятором 14. Тепловая изоляция от окружающей среды обеспечивается кожухом 4 из ПВХ, теплоизолированного пенопластом 3. Амперметром 16 и вольтметром 17 измеряются параметры питания ТЭ. Термостатирование теплых спаев термоэлемента обеспечивает жидкостный термостат 5. Управление потоком воздуха осуществляется изменением скорости вращения вентилятора 14 через блок питания 15. Температура воздуха на входе в ТЭ, а также значения температуры горячего и холодного спаев определяются дифференциальными хромель-ко-

пелевыми термопарами 8, 9, 10 соответственно. Сигналы термопар переключателем 7 выводятся на вольтметр 6. Свободные спаи 11 термопар помещены в нуль-термостат 12. Температура и скорость воздуха на выходе из термоэлемента определяется датчиком 2 анемометра 18.

Водяным термостатом 12 обеспечивается поддержание температуры теплых спаев термоэлементов на уровне температуры окружающей среды. С помощью блока питания регулируется ток через ТЭ, который измеряется амперметром 16. Необходимая скорость движения воздуха через ТЭ устанавливается путем регулирования блока питания вентилятора с контролем ее значения по показаниям анемометра 18.

ТЭ изготовлен из термоэлектрических экструдированных материалов на основе Bi_2Te_3 со средними значениями термоэдс $\alpha \approx 192 \text{ В/К}$ и электропроводности $\sigma \approx 985 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Исходный материал разрезали на пластины размерами $2,4 \times 10 \times 20 \text{ мм}$, из которых образованы проникаемые ветви с шагом 2 мм по пять пластин в каждой ветви. Площадь поперечного сечения термоэлемента вместе с каналами с учетом боковых зазоров 2 мм по периметру составила $6,44 \text{ см}^2$, в которой площадь материала веток составляет $2,4 \text{ см}^2$, а площадь проходного сечения $4,04 \text{ см}^2$. Таким образом, значение параметра проницаемости, равного отношению последней к общей площади, составило 0,63.

В результате проведенных измерений были получены характеристики проникаемого ТЭ элемента для различных скоростей потока воздуха в режимах охлаждения и нагрева. Эти экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими расчетами, проведенными по методике, описанной в [5], с учетом коммутационных пластин, тепло-

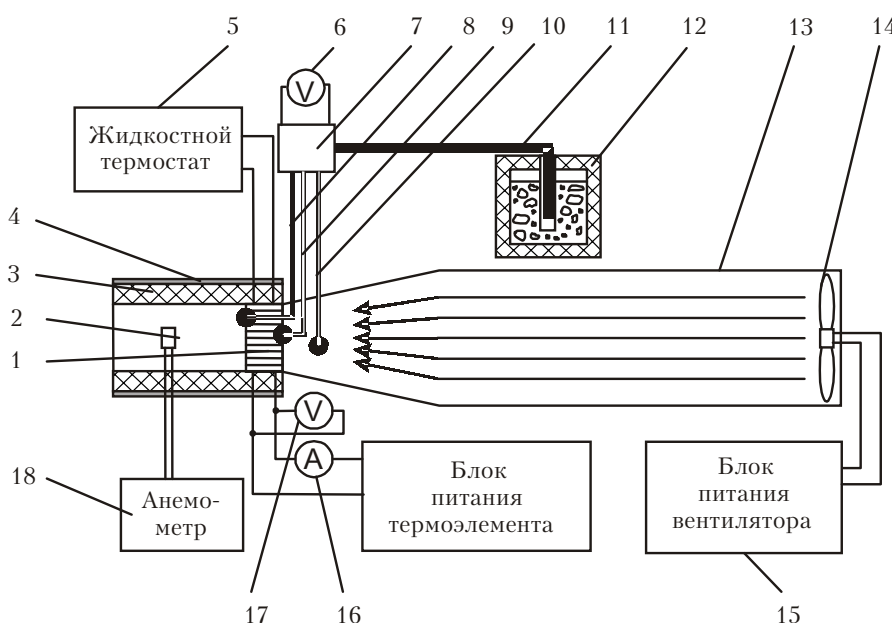


Рис.2. Схема стенда для исследования проникаемых термоэлементов

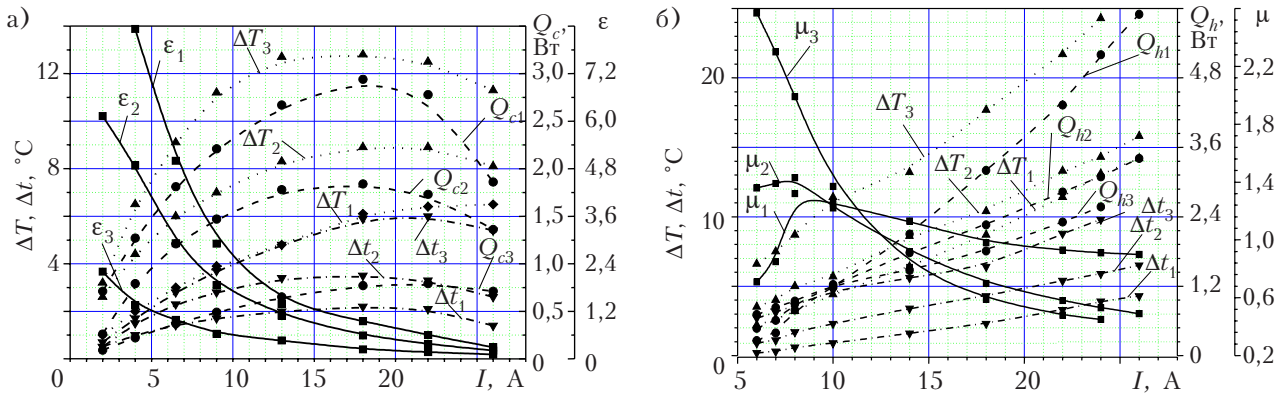


Рис. 3. Характеристики термоэлемента в режиме охлаждения (а) и нагрева (б) для различной скорости воздуха (нижний индекс 1 в обозначениях соответствует скорости воздуха 1 м/с; индекс 2 — 0,4 м/с; индекс 3 — 0,1 м/с для режима охлаждения и 0,2 м/с для нагрева)

переходов и теплообменной системы на теплых спаях ТЭ.

На рис. 3, а представлены зависимости разности температур между теплыми и холодными спаями ТЭ ΔT , глубины охлаждения воздуха (разности температур воздуха на входе и выходе) Δt , холодопроизводительности Q_c и холодильного коэффициента ϵ от величины электрического тока I , полученные в режиме охлаждения. Отсюда видно, что области максимальной глубины охлаждения воздуха соответствуют значениям максимальной холодопроизводительности для всех значений скорости воздуха. Холодильный коэффициент возрастает с уменьшением тока питания и достигает максимальных значений при таком минимальном токе питания, который еще обеспечивает охлаждение воздуха. Для скорости воздуха 1 м/с $Q_{c\max} = 2,94$ Вт, $\Delta T = 6,5^\circ\text{C}$, $\epsilon_{\max} = 8,3$, что превышает значения холодильного коэффициента для традиционных ТЭ на 5–8%.

На рис. 3, б представлены зависимости отопительного коэффициента μ термоэлемента, теплопроизводительности Q_h , перепада температур воздуха Δt и значений ΔT от тока питания в режиме нагрева. При скорости воздуха 0,4 м/с получены значения $Q_h = 8,52$ Вт, $\mu_{\max} = 3,5$, $\Delta T = 15,8^\circ\text{C}$, $\Delta t = 6,5^\circ\text{C}$. Отсюда видно, что отопительный коэффициент в этом режиме имеет максимум (при токе 8 А), в котором энергетическая эффективность максимальна. Полученные значения μ на 6–9% выше, чем у традиционных ТЭ.

Выводы

Таким образом, исследования показали, что предложенная конструкция проникаемого термоэлемента позволяет обеспечить охлаждение или нагрев воздуха на 5–15°C с энергетической эффективностью, превышающей на 5–9% возможности традиционных термоэлементов. Данная конструкция может быть усовершенствована с целью достижения больших значений холодо-

теплопроизводительностей путем использования последовательного электрического соединения плоскостей ветви, использования жидкостных теплоносителей и каскадирования. Применение каскадирования [6] в проникаемых термоэлектрических системах значительно увеличивает глубину охлаждения и повышает холодильный коэффициент, особенно при граничных перепадах температуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лобунец Ю. Н. Методы расчета и проектирования термоэлектрических преобразователей энергии. – Киев: Наукова думка, 1989. [Lobunets Yu. N. Metody rascheta i proektirovaniya termoelektricheskikh preobrazovatelei energii. Kiev: Naukova dumka, 1989]
2. Черкез Р. Г. Система термоэлектрического кондиционирования воздуха на основе проникаемых термоэлементов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – №2. – С. 34–36. [Cherkez R. G. Sistema termoelektricheskogo konditsionirovaniya vozdukh na osnove pronitsaemykh termoelementov // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2009. N 2. P. 34]
3. Дудаль В. О., Черкез Р. Г. Компьютерное моделирование проникаемых термоэлементов в режиме нагрева // Термоэлектричество. – 2009. – №4. – С. 57–64. [Dudal' V. O., Cherkez R. G. Komp'yuternoe modelirovaniye pronitsaemykh termoelementov v rezhime nagreva // Termoelektrichestvo. 2009. N 4. P. 57]
4. Вайнер А. Л. Термоэлектрические охладители. – Москва: Радио и связь, 1983. [Vainer A. L. Termoelektricheskie okhladiteli. Moskva: Radio i svyaz', 1983]
5. Anatychuk L. I., Cherkez R. G. Permeable planar cooling thermoelement // Journal of Thermoelectricity – 2008. – №3. – С. 5–12.
6. Вайнер А. Л. Каскадные термоэлектрические источники холода. – Москва: Советское радио, 1976. [Vainer A. L. Kaskadnye termoelektricheskie istochniki kholoda. Moskva: Sovetskoe radio, 1976]

Дата поступления рукописи
в редакцию 25.07 2011 г.

Cherkez R.G, Demianiuk D.D. **Experimental research of the energy characteristics of a permeable thermoelement.**

Keywords: thermoelectricity, thermoelements, permeable thermoelement, coefficient of performance.

The construction of permeable thermoelement used for cooling and heating of gas or liquid flux has been designed. Energy characteristics of the semiconductor thermal element based on Bi—Te—Se—Sb materials have been presented. The results showed the possibility of ensuring the temperature difference of 5—15°C during cooling or heating of air, with the energy efficiency exceeding by 5—9% that of the traditional thermoelectric elements.

Ukraine, Chernovtsy, Yuriy Fedkovych Chernovtsy National University, Institute of thermoelectricity.

Черкез Р. Г., Дем'янюк Д. Д. **Експериментальне дослідження енергетичних характеристик проникного термоелемента.**

Ключові слова: термоелектрика, термоелементи, проникні матеріали, холодильний коефіцієнт, опалювальний коефіцієнт.

Запропоновано конструкцію проникного термоелемента для охолодження та нагрівання потоків газу або рідини. Надано значення енергетичних характеристик термоелемента з напівпровідникових матеріалів на основі Bi—Te—Se—Sb. Результати досліджень показали можливість забезпечення охолодження або нагрівання повітря на 5—15°C з енергетичною ефективністю, що на 5—9% перевищує можливості традиційних термоелектричних елементів.

Україна, м. Чернівці, ЧНУ імені Юрія Федьковича, Інститут термоелектрики.

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

Ащеулов Анатолий Анатольевич, докт. техн. наук, главный научный сотрудник Черновицкого национального университета им. Ю. Федьковича

Басюк Олег Петрович, научный консультант ЧП «Политехперіодика»

Козут Игорь Тимофеевич, докт. техн. наук, профессор кафедры радиофизики и электроники Прикарпатского национального университета им. В. Стефаника, г. Ивано-Франковск

Кудрик Ярослав Ярославович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев

Кутний Владимир Евдокимович, канд. техн. наук, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

Митягин Александр Юрьевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

Николаенко Юрий Егорович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник НТУУ «Киевский политехнический институт»

Панов Леонид Иванович, канд. тех. наук, профессор Одесского национального политехнического университета

Пекарь Григорий Соломонович, докт. физ.-мат. наук, профессор Института физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев

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

Чечельницкий Виктор Яковлевич, канд. техн. наук, доцент Одесского национального политехнического университета

Малогабаритная вакуумная установка термического испарения настольного типа

МВУ ТМ-ТИС Т

Назначение:

Нанесение плёнок металлов (Al, Au, Cu и др.) методом термического испарения в вакууме.

Особенности:

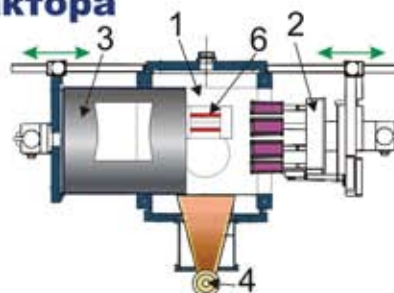
- Сменный подложкодержатель для обработки подложек (пластин):

60x48 мм	6 шт.	} двухсторонняя обработка
30x48 мм	12 шт.	
Ø 150 мм	2 шт.	} односторонняя обработка
Ø 60, 76, 100 мм	4 шт.	

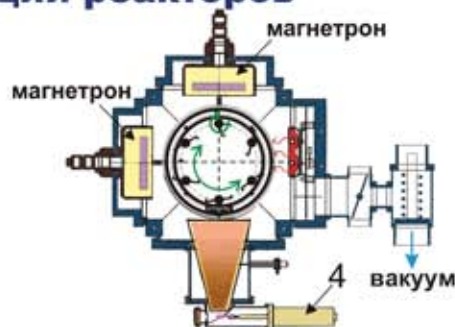
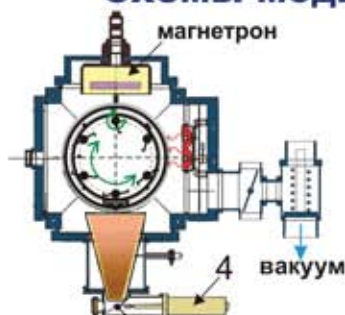
- Процессы нанесения металлических плёнок в высоком вакууме
- Подготовка поверхности подложек – нагрев и ионная очистка
- Откачка реактора до предельного разряжения $5 \cdot 10^{-4}$ Па
- Автоматизированное управление от микропроцессора
- Малогабаритная безмасляная вакуумная система откачки
- Автономная система водяного охлаждения
- Потребляемая мощность не более 5 кВт
- Площадь, занимаемая одной установкой ~1,5 м²
- Возможны комбинации нескольких источников на одной рабочей камере



Схема реактора



Схемы модификаций реакторов



МВУ ТМ-ТИС-Магна

МВУ ТМ-ТИС-Магна x 2

- 1 Рабочая камера;
- 2 Планетарный подложкодержатель;
- 3 Вращающийся экран – цилиндрическая заслонка;
- 4 Испаритель;

- 5 Кварцевый датчик контроля толщины пленки;
- 6 Система нагрева и ионной очистки;
- 7 Дроссельная заслонка;
- 8 Клапан.



19-21 сентября 2012

VI Международная конференция

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ДОСТИЖЕНИЯ
В ОБЛАСТИ РАДИОТЕХНИКИ, ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Организаторы

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ,
УКРАИНСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ ИНФОРМАТИКИ, ЗАПОРОЖСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Рабочие языки — украинский, русский, английский

Тематика конференции

- Радиотехнические, радиолокационные и навигационные системы
- Телекоммуникационные системы и сети
- Современные информационные системы и технологии
- Информационные технологии в проектировании и производстве электронных аппаратов
- Безопасность информационно-коммуникационных систем
- Физика и технология микро- и наноэлектроники

69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64
Телефон/Факс +38 (061) 764-32-81, 769-84-31
E-mail Оргкомитета: kolevis@zntu.edu.ua
<http://lomonosov-msu.ru/rus/event/1119/>

Номер готовили

*Арзамас, Баку, Екатеринбург, Ивано-Франковск,
Киев, Москва, Новосибирск, Одесса, Прага,
Стамбул, Ташкент, Фрязино, Харьков, Черновцы.*



Пишите

Подписывайтесь

Читайте